

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-075835
(43)Date of publication of application : 15.03.2002

(51)Int.Cl. H01L 21/027
G02B 19/00
G03F 7/20

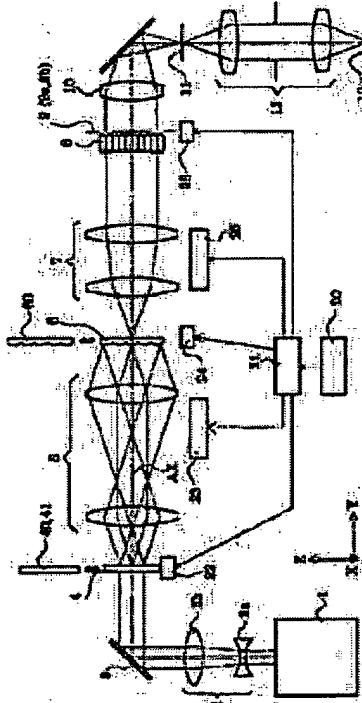
(21)Application number : 2000-260468 (71)Applicant : NIKON CORP
(22)Date of filing : 30.08.2000 (72)Inventor : TANITSU OSAMU
SUENAGA YUTAKA
HIRAGA KOICHI

(54) ILLUMINATION OPTICAL DEVICE AND EXPOSURE SYSTEM WITH THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an illumination optical device in which compacting and the ensuring of excellent optical performance can be made to coexist.

SOLUTION: The illumination optical device has a first optical integrators (6, 60) forming the first majority light sources based on luminous flux from a light source means (1), and the second optical integrator (8) forming a second majority light sources on the basis of luminous flux from a first majority light sources, and a surface to be irradiated (11) is lit by luminous flux from a second majority light sources. The illumination optical device has luminous-flux transducers (4, 40 and 41) converting luminous flux from the light source means into luminous flux having a fixed shape, and the first optical system (5) condensing luminous flux from the transducers and projecting the luminous flux to the first optical integrator from the oblique direction approximately symmetrically to an optical axis (AX). The number of openings of outgoing luminous flux from the transducers is set at a value larger than that of luminous flux from the first majority light sources.



*** NOTICES ***

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

CLAIMS

[Claim(s)]

[Claim 1]The 1st optical integrator for forming the 1st a large number light source which consists of many light sources based on light flux from a light source means.

It is based on light flux from said 1st a large number light source, and they are many light sources more.

A light flux sensing element for being the illumination optical device provided with the above, and changing light flux from said light source means into light flux of predetermined form, Condense light flux from said light flux sensing element, and it has the 1st optical system for making it enter into said 1st optical integrator from an oblique direction almost symmetrically to a standard optic axis, A numerical aperture of emitted light flux from said light flux sensing element is set up more greatly than a numerical aperture of light flux from said 1st a large number light source formed of said 1st optical integrator.

[Claim 2]The illumination optical device comprising according to claim 1:

The 1st diffraction optical element for said light flux sensing element to have two or more diffraction optical elements constituted to a lighting optical path enabling free insertion and detachment, and for said two or more diffraction optical elements change a parallel pencil from said light source means into light flux of a circle configuration.

The 2nd diffraction optical element for changing a parallel pencil from said light source means into zona-orbicularis-like light flux.

The 3rd diffraction optical element for changing into two or more light flux which carried out eccentricity of the parallel pencil from said light source means to said standard optic axis.

[Claim 3]The illumination optical device according to claim 1 or 2 with which magnification is characterized by having the 1st variable variable power optical system in order that said 1st optical system may change a zona-orbicularis ratio of a light source of the shape of plural poles which consists of two or more light sources which carried out eccentricity to a zona-orbicularis ratio or said standard optic axis of a light source of the shape of zona orbicularis formed as said 2nd a large number light source.

[Claim 4]In an optical path between said 1st optical integrator and said 2nd optical integrator, Light flux from the 1st a large number light source formed of said 1st optical integrator is arranged by the 2nd optical system for leading to said 2nd optical integrator, and it said 2nd optical system, An illumination optical device given in any 1 clause of Claims 1-3 in order to change a size of said 2nd a large number light source, wherein magnification has the 2nd variable variable power optical system.

[Claim 5]Said 1st optical integrator has two or more micro fly eyes constituted to a lighting optical path enabling free insertion and detachment, and said two or more micro fly eyes, The 1st micro fly eye which consists of a microlens of a large number which have the 1st focal distance, An illumination optical device given in any 1 clause of Claims 1-4 having the 2nd micro fly eye which consists of a microlens of a large number which have the 2nd substantially different focal distance from said 1st focal distance.

[Claim 6]The illumination optical device according to claim 5, wherein a focal distance of each microlens which constitutes said 1st micro fly eye is set as a value of a request for forming a zona-orbicularis-like light source or a plural-poles-like light source which has a zona-orbicularis ratio of ranges from 2/3 to 3/4 as said 2nd a large number light source.

[Claim 7]An exposure device comprising:

An illumination optical device given in any 1 clause of Claims 1-6.

A projection optical system for carrying out projection exposure of the pattern of a mask arranged in said irradiated plane to a photosensitive substrate.

[Translation done.]

*** NOTICES ***

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DETAILED DESCRIPTION

[Detailed Description of the Invention]**[0001]**

[Field of the Invention]This invention relates to the suitable illumination optical device for the exposure device for manufacturing micro devices, such as a semiconductor device, an image sensor, a liquid crystal display element, and a thin film magnetic head, by a lithography step especially about the exposure device provided with the illumination optical device and this illumination optical device.

[0002]

[Description of the Prior Art]In this kind of typical exposure device, the light flux ejected from the light source forms the 1st a large number light source via the micro fly eye as the 1st optical integrator. Subsequently, the light flux from the 1st a large number light source forms the 2nd a large number light source, i.e., a secondary light source, via the fly eye lens as the 2nd optical integrator. The light flux from a secondary light source enters into a condenser lens, after being restricted via the aperture diaphragm arranged near the backside focal plane of a fly eye lens.

[0003]The light flux condensed with the condenser lens illuminates in superposition the mask in which the predetermined pattern was formed. Image formation of the light which penetrated the pattern of the mask is carried out on a wafer via a projection optical system. In this way, on a wafer, projection exposure (transfer) of the mask pattern is carried out. The pattern formed in the mask is integrated highly and it is indispensable to transfer this minute pattern correctly on a wafer to acquire uniform illuminance distribution on a wafer.

[0004]By changing the size of the opening (light transmission section) of the aperture diaphragm arranged at the injection side of a fly eye lens in recent years, The technology of changing the size of the secondary light source formed with a fly eye lens, and changing the coherency sigma of Lighting Sub-Division (sigma value = the pupil diameter of the diameter of an aperture diaphragm / projection optical system or the incidence side numerical aperture of the number of injection side openings / projection optical system of a sigma value = illumination-light study system) attracts attention. By setting up the form of the opening of the aperture diaphragm arranged at the injection side of a fly eye lens the shape of zona orbicularis, and in the shape of 4 holes (the shape of namely, 4 poles). The form of the secondary light source formed with a fly eye lens is restricted the shape of zona orbicularis, and in the shape of 4 poles, and the technology of raising the depth of focus and resolution of a projection optical system attracts attention.

[0005]

[Problem to be solved by the invention]In this case, if it is going to realize the illumination optical device which restricts the form of a secondary light source the shape of zona orbicularis, and in the shape of 4 poles, and performs deformation illuminations (4 very zona-orbicularis Lighting Sub-Division, Lighting Sub-Division, etc.) and usual circular Lighting Sub-Division, avoiding the light volume loss in an aperture diaphragm good. It complicates and is not only easy to enlarge composition, but it is considered that manufacture becomes impossible actually depending on the case.

[0006]This invention is made in view of above-mentioned SUBJECT, and is a thing.

The purpose is to provide the exposure device provided with the illumination optical device and this illumination optical device which deformation illuminations, such as zona-orbicularis Lighting Sub-Division and 4 pole Lighting Sub-Division, and usual circular Lighting Sub-Division can be [illumination optical device] possible, stopping good, and can reconcile miniaturization and reservation of good optical performance.

[0007]

[Means for solving problem]The 1st optical integrator for forming the 1st a large number light source which consists of many light sources based on light flux from a light source means in this invention, in order to solve said SUBJECT, In an illumination optical device which is provided with the 2nd optical integrator for forming the 2nd a large number light source which consists of many light sources more based on light flux from said 1st a large number light source, and illuminates an irradiated plane by light flux from said 2nd a large number light source, A light flux sensing element for changing light flux from said light source means into light flux of predetermined form, Condense light flux from said light flux sensing element, and it has the 1st optical system for making it enter into said 1st optical integrator from an oblique direction almost symmetrically to a standard optic axis, An illumination optical device, wherein a numerical aperture of emitted light flux from said light flux sensing element is set up more greatly than a numerical aperture of light flux from said 1st a large number light source formed of said 1st optical integrator is provided.

[0008]According to the desirable mode of the 1st invention, said light flux sensing element is provided with the following.

The 1st diffraction optical element to have two or more diffraction optical elements constituted to a lighting optical path enabling free insertion and detachment, and for said two or more diffraction optical elements change a parallel pencil from said light source means into light flux of a circle configuration.

The 2nd diffraction optical element for changing a parallel pencil from said light source means into zona-orbicularis-like light flux.

The 3rd diffraction optical element for changing into two or more light flux which carried out eccentricity of the parallel pencil from said light source means to said standard optic axis.

[0009]According to the desirable mode of the 1st invention, in order that said 1st optical system may change the zona-orbicularis ratio of the light source of the shape of plural poles which consists of two or more light sources which carried out eccentricity to the zona-orbicularis ratio or said standard optic axis of a light source of the shape of zona orbicularis formed as said 2nd a large number light source, magnification has the 1st variable variable power optical system.

[0010]According to the desirable mode of the 1st invention, in the optical path between said 1st optical integrator and said 2nd optical integrator, The 2nd optical system for leading the light flux from the 1st a large number light source formed of said 1st optical integrator to said 2nd optical integrator is arranged, and in order that said 2nd optical system may change the size of said 2nd a large number light source, magnification has the 2nd variable variable power optical system.

[0011]According to the desirable mode of the 1st invention, said 1st optical integrator is provided with the following.

The 1st micro fly eye which consists of a microlens of a large number which have two or more micro fly eyes constituted to the lighting optical path enabling free insertion and detachment, and in which said two or more micro fly eyes have the 1st focal distance. The 2nd micro fly eye which consists of a microlens of a large number which have the 2nd substantially different focal distance from said 1st focal distance.

In this case, as for the focal distance of each microlens which constitutes said 1st micro fly eye, it is preferred to be set as the value of the request for forming the zona-orbicularis-like light source or plural-poles-like light source which has a zona-orbicularis ratio of the ranges from 2/3 to 3/4 as said 2nd a large number light source.

[0012]According to another aspect of affairs of this invention, an exposure device provided with the projection optical system for carrying out projection exposure of the pattern of the illumination optical device concerning above-mentioned this invention and the mask arranged in said irradiated plane to a photosensitive substrate is provided.

[0013]

[Mode for carrying out the invention]In the typical embodiment of this invention, the light flux from a light source means is changed into the light flux of the shape of zona orbicularis, or the shape of 4 poles, for example by a light flux sensing element like a diffraction optical element. It is condensed by the 1st predetermined optical system and the light flux of the shape of this zona orbicularis or the shape of 4 poles enters into the 1st optical integrator like a micro fly eye from an oblique direction almost symmetrically to an optic axis. In this way, the 1st a large number light source is formed of a micro fly eye. The light flux from the 1st a large number light source forms the secondary light source of the 2nd a large number light source, the shape of i.e., zona orbicularis, or the shape of 4 poles by the 2nd optical integrator like a fly eye lens, after passing the 2nd predetermined optical system.

[0014]In this invention, the numerical aperture of the emitted light flux from the diffraction optical element as a light flux sensing element is set up more greatly than the numerical aperture of the light flux from the 1st a large number light source formed of the micro fly eye as the 1st optical integrator. By setting up more greatly than the numerical aperture of the light flux from the 1st a large number light source the numerical aperture of the emitted light flux from a diffraction optical element, Enlargement of the 1st optical system and the 2nd optical system can be avoided, and it can avoid that manufacture of a diffraction optical element, a micro fly eye, and the 2nd optical system becomes difficult so that it may mention later for details.

[0015]As a result, in the illumination optical device of this invention, deformation illuminations, such as zona-orbicularis Lighting Sub-Division and 4 pole Lighting Sub-Division, and usual circular Lighting Sub-Division can be possible, suppressing a light volume loss good, and miniaturization and reservation of good optical performance can be reconciled. Therefore, in the exposure device incorporating the illumination optical device of this invention, the resolution and the depth of focus of a projection optical system suitable for the minute pattern which should carry out exposure projection can be obtained, and good high projection exposure of a throughput can be performed under high exposure illumination and a good exposing condition. In the exposure method which exposes the pattern of the mask arranged on an irradiated plane using the illumination optical device of this invention on a photosensitive substrate, since projection exposure can be performed under a good exposing condition, a good micro device can be manufactured.

[0016]The embodiment of this invention is described based on an accompanying drawing. Drawing 1 is a figure showing roughly the composition of the exposure device provided with the illumination optical device concerning the embodiment of this invention. In drawing 1, the X-axis is set up in the direction vertical to the space of drawing 1 along the normal line direction of the wafer which is a photosensitive substrate, respectively in [to a direction parallel to the space of drawing 1 / in the Z-axis / / in a wafer surface] a wafer surface for a Y-axis. In drawing 1, it is set up so that an illumination optical device may perform zona-orbicularis Lighting Sub-Division.

[0017]The exposure device of drawing 1 is provided with the excimer laser which supplies light with a wavelength of 248 nm (KrF) or 193 nm (ArF), for example as the light source 1 for supplying exposing light (illumination light). The almost parallel light flux ejected from the light source 1 along with the Z direction has a section of the rectangular shape prolonged long and slender in accordance with the direction of X, and enters into the beam expander 2 which consists of the cylindrical lens 2a and 2b of a couple. In the space of drawing 1 (inside of a YZ plane), each cylindrical lens 2a and 2b have negative refracting power and positive refracting power, respectively, and function as a plane-parallel plate in the field which intersects perpendicularly with space including the optic axis AX (inside of XZ flat surface). Therefore, in the space of drawing 1, the light flux which entered into the beam expander 2 is expanded, and is orthopedically operated by the light flux which has a section of predetermined rectangular shape.

[0018]The almost parallel light flux through the beam expander 2 as a plastic surgery optical system enters into the diffraction optical element (DOE) 4 for zona-orbicularis Lighting Sub-Division, after being deflected in the direction of Y by the bending mirror 3. Generally, a diffraction optical element is constituted by forming the level difference which has a pitch about the wavelength of exposing light (illumination light) in a glass substrate, and has the operation diffracted at the angle of a request of an incident beam. The diffraction optical element 4 for zona-orbicularis Lighting Sub-Division makes the optic axis AX and parallel emit radiately the thin light flux which carried out vertical incidence according to one predetermined angle of divergence, as shown in drawing 2 (a). A paraphrase will diffract with equiangularity the thin light flux which carried out vertical incidence to the diffraction optical element 4 in accordance with the optic axis AX in accordance with all directions centering on the optic axis AX. As a result, the thin light flux which carried out vertical incidence to the diffraction optical element 4 is changed into the sending light bunch which has a section of ring shape.

[0019]Therefore, after being changed into zona-orbicularis-like light flux if the thick parallel pencil carried out vertical incidence to the diffraction optical element 4 as shown in drawing 2 (b), the image (light source image of ring shape) 32 of ring shape is formed in

the focal position of the lens 31 arranged behind the diffraction optical element 4. That is, the diffraction optical element 4 forms the light intensity distribution of ring shape in a far field (or Fraunhofer diffraction field). The lens 31 makes the light intensity distribution of the ring shape formed in a far field (or Fraunhofer diffraction field) form on an after that side focal plane. Thus, the diffraction optical element 4 constitutes the light flux sensing element for changing the light flux from the light source 1 into zona-orbicularis-like light flux substantially.

[0020]in addition -- the diffraction optical element 4 is constituted to a lighting optical path, enabling free insertion and detachment -- 4 -- it is constituted so that the diffraction optical element 40 and the diffraction optical element 41 usually for circular Lighting Sub-Division very for Lighting Sub-Division, and a change are possible. Composition and an operation of the diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division and the diffraction optical element 41 usually for circular Lighting Sub-Division are mentioned later. Here, the change between the diffraction optical element 4 for zona-orbicularis Lighting Sub-Division, the diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division, and the diffraction optical element 41 usually for circular Lighting Sub-Division is performed by the 1st drive system 22 that operates based on the instructions from the control system 21.

[0021]The light flux of the shape of zona orbicularis formed via the diffraction optical element 4 enters into the afocal zoom lens 5. Maintaining the diffracting plane of the diffraction optical element 4, and the entrance plane of the micro fly eye 6 mentioned later in an optical almost conjugate relation, and maintaining an afocal system (non-focal optical system), the afocal zoom lens 5 is constituted so that magnification can be continuously changed in the predetermined range. Here, magnification change of the afocal zoom lens 5 is performed by the 2nd drive system 23 that operates based on the instructions from the control system 21.

[0022]The light flux of the shape of zona orbicularis formed via the diffraction optical element 4 enters into the afocal zoom lens 5, and forms the light source image of ring shape in the pupil surface. The light from the light source image of this ring shape serves as a parallel pencil mostly, is ejected from the afocal zoom lens 5, and enters into the micro fly eye 6. At this time, light flux enters into the entrance plane of the micro fly eye 6 from an oblique direction almost symmetrically to the optic axis AX. The micro fly eye 6 is an optical element which consists of a microlens which has the positive refractive power of the regular hexagon shape of a large number arranged densely and in all directions. Generally, a micro fly eye is constituted by performing an etching process, for example to a plane parallel plate board, and forming a microlens group.

[0023]Here, each microlens which constitutes a micro fly eye is minuter than each lens element which constitutes a fly eye lens. Unlike the fly eye lens which consists of a lens element isolated mutually, the micro fly eye is formed in one, without isolating many microlenses mutually. However, the micro fly eye is the same as a fly eye lens at the point that the lens element which has positive refractive power is arranged in all directions. In drawing 1, the number of the microlenses which constitute the micro fly eye 6 for clearizing of Drawings is set up very less than the actual condition.

[0024]Therefore, the light flux which entered into the micro fly eye 6 is divided in two dimensions by many microlenses, and the light source (condensing point) of one ring shape is formed in the backside focal plane of each microlens, respectively. Thus, the micro fly eye 6 constitutes the 1st optical integrator for forming the 1st a large number light source which consists of many light sources based on the light flux from the light source 1.

[0025]The micro fly eye 6 is constituted so that the micro fly eye 60 which is constituted to a lighting optical path, enabling free insertion and detachment, and differs in the focal distance of a microlens in the micro fly eye 6, and a change are possible. The change between the micro fly eye 6 and the micro fly eye 60 is performed by the 3rd drive system 24 that operates based on the instructions from the control system 21.

[0026]The light flux from the light source of a large number formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 illuminates the fly eye lens 8 as the 2nd optical integrator in superposition via the zoom lens 7. The zoom lens 7 is a relay optical system to which a focal distance can be continuously changed in the predetermined range, and has connected optically the backside focal plane of the micro fly eye 6, and the backside focal plane of the fly eye lens 8 to conjugate mostly. If it puts in another way, the zoom lens 7 has connected substantially the backside focal plane of the micro fly eye 6, and the entrance plane of the fly eye lens 8 to the relation of the Fourier transform.

[0027]Therefore, every time it attracts the light flux from the light source of the ring shape of a large number formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 to the backside focal plane of the zoom lens 7, it forms the radiation field of the shape of zona orbicularis centering on the optic axis AX in it at the entrance plane of the fly eye lens 8. The size of the radiation field of the shape of this zona orbicularis changes depending on the focal distance of the zoom lens 7. Change of the focal distance of the zoom lens 7 is performed by the 4th drive system 25 that operates based on the instructions from the control system 21.

[0028]The fly eye lens 8 is constituted by arranging the lens element of a large number which have positive refracting power densely and in all directions. Each lens element which constitutes the fly eye lens 8 has a section of rectangular shape [**** / the form (as a result, form of the exposure region which should be formed on a wafer) of the radiation field which should be formed on a mask]. The field by the side of incidence of each lens element which constitutes the fly eye lens 8 is formed in the sphere form which turned the convex to the incidence side, and the field by the side of an injection is formed in the sphere form which turned the convex to the injection side.

[0029]Therefore, the light flux which entered into the fly eye lens 8 is divided in two dimensions by many lens elements, and many light sources are formed in the backside focal plane of each lens element into which light flux entered, respectively. In this way, the substantial surface light source (henceforth a "secondary light source") of the shape of zona orbicularis which has the almost same light intensity distribution as the radiation field formed of the incoming beam to the fly eye lens 8 is formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8. Thus, the fly eye lens 8 constitutes the 2nd optical integrator for forming the 2nd a large number light source which consists of many light sources more based on the light flux from the 1st a large number light source formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 which is the 1st optical integrator.

[0030]The light flux from the secondary light source of the shape of zona orbicularis formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8 enters into the aperture diaphragm 9 arranged in the neighborhood. This aperture diaphragm 9 is supported on the turret (rotor plate : drawing 1 un-illustrating) pivotable to the circumference of a predetermined axis line parallel to the optic axis AX.

[0031]Drawing 3 is a figure in which two or more aperture diaphragms show roughly the composition of the turret arranged at circumference shape. As shown in drawing 3, eight aperture diaphragms which have a light transmission region shown in the turret board 400 with the slash in a figure are provided along with the circumferencial direction. The turret board 400 is constituted

pivotable through the central point O at the circumference of an axis line parallel to the optic axis AX. Therefore, one aperture diaphragm chosen from eight aperture diaphragms can be positioned in a lighting optical path by rotating the turret board 400. Rotation of the turret board 400 is performed by the 5th drive system 26 that operates based on the instructions from the control system 21.

[0032]The three zona-orbicularis aperture diaphragms 401, 403, and 405 from which a zona-orbicularis ratio differs are formed in the turret board 400. Here, the zona-orbicularis aperture diaphragm 401 has a transmission region of the shape of zona orbicularis which has a zona-orbicularis ratio of r_{11}/r_{21} . The zona-orbicularis aperture diaphragm 403 has a transmission region of the shape of zona orbicularis which has a zona-orbicularis ratio of r_{12}/r_{22} . The zona-orbicularis aperture diaphragm 405 has a transmission region of the shape of zona orbicularis which has a zona-orbicularis ratio of r_{13}/r_{21} .

[0033]Three 4 pole aperture diaphragms 402, 404, and 406 from which a zona-orbicularis ratio differs are formed in the turret board 400. Here, in the zona-orbicularis-like field which has a zona-orbicularis ratio of r_{11}/r_{21} , 4 pole aperture diaphragm 402 has four circular transmission regions which carried out eccentricity. In the zona-orbicularis-like field which has a zona-orbicularis ratio of r_{12}/r_{22} , 4 pole aperture diaphragm 404 has four circular transmission regions which carried out eccentricity. In the zona-orbicularis-like field which has a zona-orbicularis ratio of r_{13}/r_{21} , 4 pole aperture diaphragm 406 has four circular transmission regions which carried out eccentricity.

[0034]Two circular opening diaphragms 407 and 408 from which a size (caliber) differs are formed in the turret board 400. Here, the circular opening diaphragm 407 has a circular transmission region of the size of two r_{22} , and the circular opening diaphragm 408 has a circular transmission region of the size of two r_{21} .

[0035]Therefore, by choosing zona-orbicularis 1 of the three zona-orbicularis aperture diaphragms 401, 403, and 405, and positioning in a lighting optical path, the zona-orbicularis light flux which has three different zona-orbicularis ratios can be restricted correctly (regulation), and three kinds of zona-orbicularis Lighting Sub-Division with which zona-orbicularis ratios differ can be performed. three 4 — very — one 4 in the aperture diaphragms 402, 404, and 406 — three kinds of 4 from which restricts correctly four eccentricity light flux which has three different zona-orbicularis ratios by choosing an aperture diaphragm very much and positioning in a lighting optical path, and a zona-orbicularis ratio differs — it can illuminate very much. Two kinds of usual circular Lighting Sub-Division with which sigma values differ can be performed by choosing circular opening 1 of two circular opening diaphragms 407 and 408, and positioning in a lighting optical path.

[0036]In drawing 1, since a secondary zona-orbicularis-like light source is formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8, one zona-orbicularis aperture diaphragm chosen from the three zona-orbicularis aperture diaphragms 401, 403, and 405 as the aperture diaphragm 9 is used. However, it is illustration-like [the composition of the turret shown in drawing 3], and the kind and number of aperture diaphragms which are arranged are not limited to this. The possible aperture diaphragm of changing the size and form of a light transmission area suitably may be attached fixed in a lighting optical path, without being limited to the aperture diaphragm of a turret system. It can replace with two circular opening diaphragms 407 and 408, and the tris diaphragm to which the diameter of a circular opening can be changed continuously can also be provided.

[0037]The light from the secondary light source through the aperture diaphragm 9 which has a zona-orbicularis-like opening (light transmission section) carries out uniform illumination of the mask 11 in which the predetermined pattern was formed in superposition, after receiving a condensing operation of the condenser optical systems 10. The light flux which penetrated the pattern of the mask 11 forms the image of a mask pattern via the projection optical system 12 on the wafer 13 which is a photosensitive substrate. In this way, the pattern of the mask 11 is exposed one by one by each exposure region of the wafer 13 by performing one-shot exposure or scan exposure, carrying out drive controlling of the wafer 13 in two dimensions into the flat surface (XY plane) which intersects perpendicularly with the optic axis AX of the projection optical system 12.

[0038]In one-shot exposure, a mask pattern is exposed in package to each exposure region of a wafer according to what is called a step-and-repeat system. In this case, the form of the illuminated field on the mask 11 is the rectangular shape near a square, and turns into rectangular shape also with the sectional shape of each lens element of the fly eye lens 8 near a square. On the other hand, in scan exposure, scan exposure of the mask pattern is carried out to each exposure region of a wafer, carrying out relative displacement of a mask and the wafer to a projection optical system according to what is called a step and scanning method. In this case, the ratio of a shorter side and a long side is the rectangular shape of 1:3, and the form of the illuminated field on the mask 11 turns into rectangular shape [**** / the sectional shape of each lens element of the fly eye lens 8 / this].

[0039]Drawing 4 is a figure showing roughly the composition from the diffraction optical element 4 to the entrance plane of the micro fly eye 6, and is a figure explaining an operation of the afocal zoom lens 5. As shown in drawing 4 (a), the light flux diffracted by the diffraction optical element 4 in accordance with all directions to the optic axis AX with the equiangularity of the angle alpha, After passing the afocal zoom lens 5 of the magnification m_1 , in accordance with all directions, oblique incidence is carried out to the entrance plane of the micro fly eye 6 to the optic axis AX with the equiangularity of the angle theta 1. The size of the radiation field formed in the entrance plane of a micro fly eye at this time is d_1 .

[0040]If the magnification of the afocal zoom lens 5 is changed to m_2 from m_1 as shown in drawing 4 (b), here, After the light flux diffracted by the diffraction optical element 4 in accordance with all directions to the optic axis AX with the equiangularity of the angle alpha passes the afocal zoom lens 5 of the magnification m_2 , in accordance with all directions, oblique incidence of it is carried out to the entrance plane of the micro fly eye 6 to the optic axis AX with the equiangularity of the angle theta 2. The size of the radiation field formed in the entrance plane of the micro fly eye 6 at this time is d_2 .

[0041]The sizes d_1 and d_2 of the radiation field formed in the degrees theta1 and theta2 of incidence angle of the light flux to the entrance plane of the micro fly eye 6, and the entrance plane of the micro fly eye 6 here, Among the magnifications m_1 and m_2 of the afocal zoom lens 5, the relation shown in the following formula (1) and (2) is materialized.

$$\text{theta2} = (\text{m}_1/\text{m}_2) - \text{theta1} \quad (1)$$

$$\text{d}_2 = (\text{m}_2/\text{m}_1) - \text{d}_1 \quad (2)$$

[0042]When a formula (1) is referred to, by changing the magnification m of the afocal zoom lens 5 continuously shows that the degree theta of incidence angle of the light flux to the entrance plane of the micro fly eye 6 can be changed continuously.

[0043]Drawing 5 is a figure showing roughly the composition from the micro fly eye 6 to the aperture diaphragm 9, and is a figure showing signs that the light flux which carried out oblique incidence to the entrance plane of the micro fly eye 6 forms a zona-

orbicularis-like radiation field in the entrance plane of the fly eye lens 8. As a solid line shows drawing 5 (a), the light flux which carried out oblique incidence from the predetermined direction at an angle of predetermined to the entrance plane of the micro fly eye 6. Holding an angle, even after carrying out image formation via each microlens, oblique incidence is carried out to the zoom lens 7, and the radiation field which has predetermined width in the position which carried out eccentricity only of the predetermined distance from the optic axis AX in the entrance plane of the fly eye lens 8 is formed.

[0044]Actually, as a dashed line shows drawing 5 (a), light flux enters into the entrance plane of the micro fly eye 6 from an oblique direction almost symmetrically to the optic axis AX. If it puts in another way, in accordance with all directions, light flux will carry out oblique incidence with equiangularity a center [the optic axis AX]. Therefore, as shown in drawing 5 (b), the radiation field of the shape of zona orbicularis centering on the optic axis AX will be formed in the entrance plane of the fly eye lens 8. The secondary light source of the shape of same zona orbicularis as the radiation field formed in the entrance plane will be formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8.

[0045]On the other hand, as mentioned above, the opening (see 401,403,405 of drawing 3) of the shape of zona orbicularis corresponding to a secondary zona-orbicularis-like light source is formed in the zona-orbicularis aperture diaphragm 9 arranged near the backside focal plane of the fly eye lens 8. In this way, a secondary zona-orbicularis-like light source can be formed without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, and zona-orbicularis Lighting Sub-Division can be performed, without almost carrying out a light volume loss in the zona-orbicularis aperture diaphragm 9 which, as a result, restricts the light flux from a secondary light source.

[0046]Drawing 6 is a figure showing roughly the composition from the diffraction optical element 4 to the entrance plane of the fly eye lens 8, and is a figure explaining the magnification of the afocal zoom lens 5 and the focal distance of the zoom lens 7, the size of the radiation field of the shape of zona orbicularis formed in the entrance plane of the fly eye lens 8, and a relation with form. In drawing 6, the beam of light ejected from the diffraction optical element 4 with the degree alpha of angle of diffraction enters into the micro fly eye 6 at the angle theta to the optic axis AX, after passing the afocal zoom lens 5 of the magnification m. That is, numerical aperture NA1 of the emitted light flux from the diffraction optical element 4 is expressed with $NA1 = n \cdot \sin \alpha$ (n is a refractive index of space).

[0047]As for the micro fly eye 6, the focal distance is constituted for size (diameter of circle circumscribed to each microlens of regular hexagon shape) from the microlens of f_1 by a . The center light ejected from each light source formed of the micro fly eye 6 with the degree theta of angle of emergence reaches the entrance plane of the fly eye lens 8 via the zoom lens 7 of the focal distance f_2 . Similarly, the beam group ejected from each light source to center light in the predetermined angle range (the degree beta of the maximum angle of emergence) also reaches the entrance plane of the fly eye lens 8. In this way, the incidence range of the light flux in the entrance plane of the fly eye lens 8 turns into a range which has the width b focusing on the height y from the optic axis AX. That is, as shown in drawing 5 (b), the radiation field formed in the entrance plane of the fly eye lens 8 and by extension, the secondary light source formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8 will have height y from the optic axis AX, and will have the width b .

[0048]By the way, when a parallel pencil enters into the micro fly eye 6 and half width of the difference angle of the emitted light flux from each light source formed is set to gamma, the numerical aperture of the micro fly eye 6 is expressed with $n \cdot \sin \gamma$. Since light flux enters into the entrance plane of the micro fly eye 6 from an oblique direction with the degree theta of incidence angle in this embodiment (a paraphrase will enter convergence light flux), The degree beta of the maximum angle of emergence of the emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 is expressed with total with the angle gamma corresponding to numerical aperture $n \cdot \sin \gamma$ of the micro fly eye 6 mentioned above with the degree theta of incidence angle to the micro fly eye 6. And numerical aperture NA2 of the emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 is expressed with $NA2 = n \cdot \sin \beta$.

[0049]Here, between the degrees theta of incidence angle to the half width (angle of diffraction) alpha and the micro fly eye 6 of a difference angle of emitted light flux from the diffraction optical element 4, the relation shown by the following formula (3) is materialized.

$$\theta = (1/m) - \alpha \quad (3)$$

[0050]Height [of a secondary zona-orbicularis-like light source] y and its width b are expressed with the following formula (4) and (5), respectively.

$$y = f_2 \cdot \sin \theta = f_2 \cdot \sin (\alpha/m) \quad (4)$$

$$b = (f_2/f_1) - a \quad (5)$$

[0051]The degree beta of the maximum angle of emergence of the emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 is expressed with the following formula (6).

$$\beta = (a/2)/f_1 = (a/f_1)/2 \quad (6)$$

[0052]Therefore, the zona-orbicularis ratio A specified by the ratio of inside diameter ϕ_{ii} of a secondary zona-orbicularis-like light source and outer diameter ϕ_{io} is expressed with the following formula (7).

[Mathematical formula 1]

$$\begin{aligned} A &= \phi_{ii}/\phi_{io} = (2y - b)/(2y + b) \\ &= (2f_2 \cdot \sin (\alpha/m) - (f_2/f_1) - a) / [2f_2 \cdot \sin (\alpha/m) + (f_2/f_1) - a] \\ &= \{2\sin(\alpha/m) - a/f_1\} / \{2\sin(\alpha/m) + a/f_1\} \\ &= \{\sin(\alpha/m) - \beta\} / \{\sin(\alpha/m) + \beta\} \quad (7) \end{aligned}$$

[0053]Outer diameter ϕ_{io} of a secondary zona-orbicularis-like light source is expressed with the following formula (8).

[Mathematical formula 2]

$$\begin{aligned}
 \phi_0 &= 2y + b \\
 &= 2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) + (a/f_1) \cdot f_2 \\
 &= 2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) + 2\beta \cdot f_2 \quad (8)
 \end{aligned}$$

[0054] Modification of a formula (8) will obtain the relation shown in the following formula (9).

$$f_2 = \phi_0 / [2 \sin(\alpha/m) + (a/f_1)] \quad (9)$$

In this way, when the magnification m of the afocal zoom lens 5 changes without the focal distance f_2 of the zoom lens 7 changing if the formula (4) and (5) is referred to, it turns out that only the height y changes, without the width b of a secondary zona-orbicularis-like light source changing. That is, the size (outer diameter ϕ_0) and its form (zona-orbicularis ratio A) can be changed [both] by changing the magnification m of the afocal zoom lens 5, without changing the width b of a secondary zona-orbicularis-like light source.

[0055] When only the focal distance f_2 of the zoom lens 7 changes without the magnification m of the afocal zoom lens 5 changing if the formula (4) and (5) is referred to, it turns out that the width b of a secondary zona-orbicularis-like light source and its height y change in proportion to both the focal distances f_2 . That is, only the size (outer diameter ϕ_0) can be changed by changing only the focal distance f_2 of the zoom lens 7, without changing the form (zona-orbicularis ratio A) of a secondary zona-orbicularis-like light source.

[0056] By changing the magnification m of the afocal zoom lens 5, and the focal distance f_2 of the zoom lens 7 so that the relation of a formula (9) may be filled to outer diameter ϕ_0 of a fixed size if the formula (7) and (9) is referred to, It turns out that only the form (zona-orbicularis ratio A) can be changed without changing the size (outer diameter ϕ_0) of a secondary zona-orbicularis-like light source.

[0057] By the way, according to the realistic numerical embodiment, the half width (angle of diffraction) α of the difference angle of the emitted light flux from the diffraction optical element 4 is set up, for example within the limits of 4 times – 7 times. This is because the tendency for the transmissivity to fall becomes remarkable while manufacture of the diffraction optical element 4 will become difficult, if α becomes larger than 7 times. If α becomes larger than 7 times, the path of the afocal ZUZUMU lens 5 will become large, and equipment will be enlarged by extension.

[0058] In order to maintain outer diameter ϕ_0 of a secondary zona-orbicularis-like light source at a predetermined value if α becomes larger than 7 times so that it may turn out that an above-mentioned formula (8) is referred to, it is necessary to set up small the focal distance f_2 of the zoom lens 7. As a result, the necessary f number of the zoom lens 7 will become small too much, and manufacture of the zoom lens 7 will become difficult. In order to maintain outer diameter ϕ_0 of a secondary zona-orbicularis-like light source at a predetermined value if α becomes smaller than 4 times so that it may turn out that an above-mentioned formula (8) is referred to on the other hand, it is necessary to set up greatly the focal distance f_2 of the zoom lens 7. As a result, the overall length of the zoom lens 7 will become large, and equipment will be enlarged by extension.

[0059] Next, according to the realistic numerical embodiment, the degree beta of the maximum angle of emergence of the emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 is set up, for example within the limits of 1 time – 3 times. If β becomes larger than 3 times so that it may turn out that an above-mentioned formula (6) is referred to, it is necessary to set up small the focal distance f_1 of each microlens of the micro fly eye 6. As a result, it will become difficult to give necessary curvature to each microlens, and manufacture of the micro fly eye 6 will become difficult by extension.

[0060] In order to maintain outer diameter ϕ_0 of a secondary zona-orbicularis-like light source at a predetermined value if β becomes larger than 3 times so that it may turn out that an above-mentioned formula (8) is referred to, it is necessary to set up small the focal distance f_2 of the zoom lens 7. As a result, the necessary f number of the zoom lens 7 will become small too much, and manufacture of the zoom lens 7 will become difficult. In order to maintain outer diameter ϕ_0 of a secondary zona-orbicularis-like light source at a predetermined value if β becomes smaller than 1 time so that it may turn out that an above-mentioned formula (8) is referred to on the other hand, it is necessary to set up greatly the focal distance f_2 of the zoom lens 7. As a result, the overall length of the zoom lens 7 will become large, and equipment will be enlarged by extension.

[0061] As mentioned above, in a realistic numerical embodiment of this embodiment, in order to reconcile miniaturization and reservation of good optical performance, It turns out that it is required to set up more greatly than the degree beta of the maximum angle of emergence of emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 the half width (angle of diffraction) α of a difference angle of emitted light flux from the diffraction optical element 4. By setting up more greatly than numerical aperture $NA_2 = n - \sin\beta$ of emitted light flux from each light source formed of the micro fly eye 6 numerical aperture $NA_1 = n - \sin\alpha$ of emitted light flux from the diffraction optical element 4, if it puts in another way, Miniaturization and reservation of good optical performance can be reconciled.

[0062] By the way, according to the realistic numerical embodiment, it becomes possible by setting the focal distance f_1 of each microlens of the micro fly eye 6 as about 3.3 mm to change a zona-orbicularis ratio of a secondary light source continuously [the range of 1 / 2 – 2/3]. It becomes possible by setting the focal distance f_1 of each microlens of the micro fly eye 6 as about 5.0 mm to change a zona-orbicularis ratio of a secondary light source continuously [the range of 2 / 3 – 3/4]. So, the micro fly eye 6 whose focal distance f_1 is about 3.3 mm, for example, and the micro fly eye 60 whose focal distance f_1 is about 5.0 mm consist of these embodiments so that a change is possible.

[0063] Therefore, the micro fly eye 6 is able to change the zona-orbicularis ratio of a secondary light source continuously [the range of 1 / 2 – 2/3] in the state of drawing 1 set up into the lighting optical path. If it replaces with the micro fly eye 6 and the micro fly eye 60 is set up into a lighting optical path, it will become possible to change the zona-orbicularis ratio of a secondary light source continuously [the range of 2 / 3 – 3/4]. In this way, in this embodiment, it is possible to change the zona-orbicularis ratio of a secondary light source continuously [the range of 1 / 2 – 3/4].

[0064] by the way — as mentioned above, the diffraction optical element 4 is constituted to a lighting optical path, enabling free insertion and detachment — 4 [and] — it is constituted so that the diffraction optical element 40 and the diffraction optical element 41 usually for circular Lighting Sub-Division very for Lighting Sub-Division, and a change are possible. 4 pole Lighting Sub-Division

obtained by replacing with the diffraction optical element 4 and setting up the diffraction optical element 40 into a lighting optical path hereafter is explained briefly.

[0065]The diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division changes the thin light flux which carried out vertical incidence to the optic axis AX at parallel into four light flux which progresses according to a predetermined angle of emergence, as shown in drawing 7 (a). If it puts in another way, in accordance with four specific directions, it will diffract with equiangularity centering on the optic axis AX, and the thin light flux which carried out vertical incidence in accordance with the optic axis AX will turn into four thin light flux. More particularly, the thin light flux which carried out vertical incidence to the diffraction optical element 40 will be changed into four light flux, the quadrangle which connects the passage central point of four light flux which passes through the field of back parallel to the diffraction optical element 40 will turn into a square, and the center of the square will exist on the incidence-axis line to the diffraction optical element 40.

[0066]Therefore, if a thick parallel pencil carries out vertical incidence to the diffraction optical element 40 as shown in drawing 7 (b), it will be changed into four light flux and the four points (punctiform light source image) 72 will be too formed in the focal position of the lens 71 arranged behind the diffraction optical element 40. Therefore, the light flux through the diffraction optical element 40 forms four points in the pupil surface of the afocal zoom lens 5. The light from these four points serves as a parallel pencil mostly, is ejected from the afocal zoom lens 5, and forms the 1st a large number light source in the backside focal plane of the micro fly eye 6 (or 60).

[0067]The light flux from the 1st a large number light source formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 (or 60) forms the radiation field of the shape of 4 poles which consists of four radiation fields which carried out eccentricity to the entrance plane of the fly eye lens 8 symmetrically to the optic axis AX via the zoom lens 7. As a result, the secondary light source which has the almost same light intensity as the radiation field formed in the entrance plane, i.e., the secondary light source of the shape of 4 poles which consists of the four surface light sources which carried out eccentricity symmetrically to the optic axis AX, is formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8.

[0068]Corresponding to the change to the diffraction optical element 40 from the diffraction optical element 4, the change to the aperture diaphragm 9a from the zona-orbicularis aperture diaphragm 9 is performed. The aperture diaphragm 9a is one 4 pole aperture diaphragm chosen from three 4 pole aperture diaphragms 402, 404, and 406 shown in drawing 3. Thus, also when using the diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division, a secondary 4 pole-like light source can be formed, without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, 4 pole Lighting Sub-Division can be performed suppressing the light volume loss in the aperture diaphragm 9a which, as a result, restricts the light flux from a secondary light source good.

[0069]4 pole-like the outer diameter (size) and zona-orbicularis ratio (form) of a secondary light source can be similarly defined as a secondary zona-orbicularis-like light source. That is, the outer diameter of a secondary 4 pole-like light source is a diameter of circle circumscribed to the four surface light sources. The zona-orbicularis ratio of a secondary 4 pole-like light source is a ratio of a diameter of circle, i.e., an inside diameter, to the diameter of circle, i.e., the outer diameter, which are circumscribed to the four surface light sources inscribed in the four surface light sources.

[0070]In this way, both outer diameter phio of a secondary 4 pole-like light source and the zona-orbicularis ratio A can be changed by changing the magnification m of the afocal zoom lens 5 like the case of zona-orbicularis Lighting Sub-Division. The outer diameter phio can be changed by changing the focal distance f2 of the zoom lens 7, without changing the zona-orbicularis ratio A of a secondary 4 pole-like light source. As a result, the zona-orbicularis ratio A can be changed by changing suitably the magnification m of the afocal zoom lens 5, and the focal distance f2 of the zoom lens 7, without changing outer diameter phio of a secondary 4 pole-like light source.

[0071]Subsequently, usual circular Lighting Sub-Division obtained by replacing with the diffraction optical element 4 or 40, and setting up the diffraction optical element 41 for circular Lighting Sub-Division into a lighting optical path is explained. The diffraction optical element 41 for circular Lighting Sub-Division has the function to change the light flux of the rectangular shape which entered into the light flux of a circle configuration. Therefore, the circular light flux formed of the diffraction optical element 41 is expanded according to the magnification by the afocal zoom lens 5 (or reduction), and enters into the micro fly eye 6 (or 60). In this way, the 1st a large number light source is formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 (or 60).

[0072]In the entrance plane of the fly eye lens 8, the light flux from the 1st a large number light source formed in the backside focal plane of the micro fly eye 6 (or 60) forms the radiation field of the circle configuration centering on the optic axis AX via the zoom lens 7. As a result, the secondary light source of the circle configuration centering on the optic axis AX is formed also in the backside focal plane of the fly eye lens 8. In this case, the outer diameter of the secondary light source of a circle configuration can be suitably changed by changing the focal distance f2 of the zoom lens 7.

[0073]Corresponding to the change to the diffraction optical element 41 for circular Lighting Sub-Division from the diffraction optical element 4 or 40, the change to the circular opening diaphragm 9b from the zona-orbicularis aperture diaphragm 9 or 4 pole aperture diaphragm 9a is performed. The circular opening diaphragm 9b is one circular opening diaphragm chosen from two circular opening diaphragms 407 and 408 shown in drawing 3, and has an opening of the size corresponding to the secondary light source of a circle configuration. Thus, by using the diffraction optical element 41 for circular Lighting Sub-Division, without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, the secondary light source of a circle configuration is formed, and circular Lighting Sub-Division can usually be performed, suppressing the light volume loss in the aperture diaphragm which restricts the light flux from a secondary light source good.

[0074]Hereafter, the switching operation of Lighting Sub-Division in this embodiment, etc. are explained concretely. First, the information about various kinds of masks which should be exposed one by one according to a step-and-repeat system or a step and scanning method, etc. are inputted into the control system 21 via the input means 20 of a keyboard etc. The control system 21 has memorized information, including the optimal line width (resolution) about various kinds of masks, the depth of focus, etc., to the internal memory part, answers the input from the input means 20, and supplies the suitable control signal for the 1st drive system 22 - the 5th drive system 26.

[0075]That is, when carrying out zona-orbicularis Lighting Sub-Division under the optimal resolution and the depth of focus, the 1st drive system 22 positions the diffraction optical element 4 for zona-orbicularis Lighting Sub-Division in a lighting optical path based on the instructions from the control system 21. And in order to obtain the secondary light source of the shape of zona orbicularis

which has a desired size (outer diameter) and form (zona-orbicularis ratio) in the backside focal plane of the fly eye lens 8. The 2nd drive system 23 sets up the magnification of the afocal zoom lens 5 based on the instructions from the control system 21, and the 4th drive system 25 sets up the focal distance of the zoom lens 7 based on the instructions from the control system 21. Where a light volume loss is suppressed good, in order to restrict a secondary zona-orbicularis-like light source, the 5th drive system 26 rotates a turret based on the instructions from the control system 21, and positions a desired zona-orbicularis aperture diaphragm in a lighting optical path. In this way, a secondary zona-orbicularis-like light source can be formed without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, and zona-orbicularis Lighting Sub-Division can be performed, without almost carrying out a light volume loss in the aperture diaphragm which, as a result, restricts the light flux from a secondary light source.

[0076]If needed, change the magnification of the afocal zoom lens 5 by the 2nd drive system 23, or, Zona-orbicularis-like the size and zona-orbicularis ratio of a secondary light source which are formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8 can be suitably changed by switching the micro fly eyes 6 and 60 by the 3rd drive system 24, or changing the focal distance of the zoom lens 7 by the 4th drive system 25. In this case, a turret rotates according to change of the size of a secondary zona-orbicularis-like light source, and a zona-orbicularis ratio, the zona-orbicularis aperture diaphragm which has a desired size and zona-orbicularis ratio is chosen, and it is positioned in a lighting optical path. In this way, without almost carrying out a light volume loss in formation and its restriction of the shape of zona orbicularis of a secondary light source, zona-orbicularis-like the size and zona-orbicularis ratio of a secondary light source can be changed suitably, and various zona-orbicularis Lighting Sub-Division can be performed.

[0077]the basis of the optimal resolution and the depth of focus — 4 — when illuminating very much, the 1st drive system 22 is based on the instructions from the control system 21 — 4 — the diffraction optical element 40 very for Lighting Sub-Division is positioned in a lighting optical path. And in order to obtain the secondary light source of the shape of 4 poles which has a desired size (outer diameter) and form (zona-orbicularis ratio) in the backside focal plane of the fly eye lens 8. The 2nd drive system 23 sets up the magnification of the afocal zoom lens 5 based on the instructions from the control system 21, and the 4th drive system 25 sets up the focal distance of the zoom lens 7 based on the instructions from the control system 21. Where a light volume loss is suppressed good, in order to restrict a secondary 4 pole-like light source, the 5th drive system 26 rotates a turret based on the instructions from the control system 21, and positions desired 4 pole aperture diaphragm in a lighting optical path. In this way, a secondary 4 pole-like light source can be formed without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, and 4 pole Lighting Sub-Division can be performed, suppressing a light volume loss good in the aperture diaphragm which, as a result, restricts the light flux from a secondary light source.

[0078]If needed, change magnification of the afocal zoom lens 5 by the 2nd drive system 23, or, 4 pole-like a size and a zona-orbicularis ratio of a secondary light source which are formed in a backside focal plane of the fly eye lens 8 can be suitably changed by switching the micro fly eyes 6 and 60 by the 3rd drive system 24, or changing a focal distance of the zoom lens 7 by the 4th drive system 25. In this case, a turret rotates according to change of a size of a secondary 4 pole-like light source, and a zona-orbicularis ratio, 4 pole aperture diaphragm which has a desired size and a zona-orbicularis ratio is chosen, and it is positioned in a lighting optical path. In this way, where a light volume loss is suppressed good in formation and its restriction of the shape of 4 poles of a secondary light source, 4 pole-like a size and a zona-orbicularis ratio of a secondary light source can be changed suitably, and various 4 pole Lighting Sub-Division can be performed.

[0079]When carrying out usual circular Lighting Sub-Division under optimal resolution and the depth of focus at the end, the 1st drive system 22 usually positions the diffraction optical element 41 for circular Lighting Sub-Division in a lighting optical path based on instructions from the control system 21. And in order to obtain a secondary light source of a circle configuration which has a desired size (outer diameter) in a backside focal plane of the fly eye lens 8. The 2nd drive system 23 sets up magnification of the afocal zoom lens 5 based on instructions from the control system 21, and the 4th drive system 25 sets up a focal distance of the zoom lens 7 based on instructions from the control system 21.

[0080]Where a light volume loss is suppressed good, in order to restrict the secondary light source of a circle configuration, the 5th drive system 26 rotates a turret based on the instructions from the control system 21, and positions a circular opening diaphragm of a request in a lighting optical path. In using the tris diaphragm to which the diameter of a circular opening can be changed continuously, the 5th drive system 26 sets up the opening diameter of a tris diaphragm based on the instructions from the control system 21. In this way, the secondary light source of a circle configuration can be formed without almost carrying out a light volume loss based on the light flux from the light source 1, and circular Lighting Sub-Division can usually be performed, suppressing a light volume loss good in the aperture diaphragm which, as a result, restricts the light flux from a secondary light source.

[0081]The size of the secondary light source of the circle configuration formed in the backside focal plane of the fly eye lens 8 can be suitably changed if needed by changing the focal distance of the zoom lens 7 by the 4th drive system 25. In this case, a turret rotates according to change of the size of the secondary light source of a circle configuration, the circular opening diaphragm which has an opening of a desired size is chosen, and it is positioned in a lighting optical path. In this way, suppressing a light volume loss good in formation and its restriction of a circle configuration of a secondary light source, a sigma value can be changed suitably and various usual circular Lighting Sub-Division can be performed.

[0082]As mentioned above, in the illumination optical device of this embodiment, deformation illuminations, such as zona-orbicularis Lighting Sub-Division and 4 pole Lighting Sub-Division, and usual circular Lighting Sub-Division can be possible, suppressing a light volume loss good, and miniaturization and reservation of good optical performance can be reconciled. Therefore, in the exposure device of this embodiment, the resolution and the depth of focus of a projection optical system suitable for the minute pattern which should carry out exposure projection can be obtained, and good high projection exposure of a throughput can be performed under high exposure illumination and a good exposing condition.

[0083]The wafer which passed through the process (photolithography process) of exposure by the exposure device of an above-mentioned embodiment. After passing through the process to develop, a wafer process is completed through the process of resist removal of removing the unnecessary resist after the process of etching of removing portions other than the developed resist, and the process of etching, etc. And dicing which was printed in the actual assembly process after the wafer process was completed and which cuts and carries out chip making of the wafer for every circuit. The semiconductor devices (LSI etc.) as a device are eventually manufactured through each process, such as bonding which gives wiring etc. to each chip, and packaging which carries out packaging for every chip.

[0084]Although the above explanation showed the example which manufactures a semiconductor device according to the photolithography process in the wafer process which used the exposure device, According to the photolithography process using an exposure device, a liquid crystal display element, a thin film magnetic head, image sensors (CCD etc.), etc. can be manufactured as a micro device. In this way, since projection exposure can be performed under a good exposing condition in the case of the exposure method which manufactures a micro device using the illumination optical device of this embodiment, a good micro device can be manufactured.

[0085]In an above-mentioned embodiment, it can constitute so that the diffraction optical elements 4, 40, and 41 as a light flux sensing element and the micro fly eyes 6 and 60 as the 1st optical integrator may be positioned, for example in a lighting optical path by a turret system. For example, the change of the above-mentioned diffraction optical elements 4, 40, and 41 and the micro fly eyes 6 and 60 can also be performed using a publicly known slider mechanism.

[0086]In the above-mentioned embodiment, the form of the microlens which constitutes the micro fly eyes 6 and 60 is set as a right hexagon. This is because it cannot arrange densely but a light volume loss occurs, so the right hexagon is selected as a circularly near polygon in the microlens of a circle configuration. However, the form of each microlens which constitutes the micro fly eyes 6 and 60 can use other suitable form which includes rectangular shape, for example, without being limited to this. Although refracting power of the microlens which constitutes the micro fly eyes 6 and 60 is made into positive refractive power in each above-mentioned embodiment, the refracting power of this microlens may be negative.

[0087]In the above-mentioned embodiment, when performing usual circular Lighting Sub-Division, the diffraction optical element 41 is positioned in a lighting optical path, but use of this diffraction optical element 41 is also ommissible. In an above-mentioned embodiment, although the diffraction optical element is used as a light flux sensing element, a micro fly eye and a dioptrics element like microlens prism can also be used, for example, without being limited to this. By the way, the detailed explanation about the diffraction optical element which can be used by this invention is indicated by the US,5,850,300,B gazette etc.

[0088]In the above-mentioned embodiment, the aperture diaphragm for restricting the light flux of a secondary light source is arranged near the backside focal plane of the fly eye lens 8. However, the composition which omits arrangement of an aperture diaphragm and does not restrict the light flux of a secondary light source at all is also possible by setting up small enough the cross-section area of each lens element which constitutes a fly eye lens depending on the case.

[0089]Although the secondary light source of the shape of zona orbicularis or the shape of 4 poles is formed in illustration in deformation illumination in the above-mentioned embodiment, The secondary light source of the shape what is called of plural poles or the shape of a multi-electrode like the secondary light source of the shape of 2 poles which consists of the two surface light sources which carried out eccentricity to the optic axis, and the secondary light source of the shape of 8 poles which consists of the eight surface light sources which carried out eccentricity to the optic axis can also be formed.

[0090]Although it has composition which condenses the light from the secondary light source formed in the position of the aperture diaphragm 9 of the condenser optical systems 10 in an above-mentioned embodiment, and illuminates the mask 11 in superposition, Between the condenser optical systems 10 and the mask 11, a lighting field diaphragm (mask blinds) and the relay optical system which forms the image of this lighting field diaphragm on the mask 11 may be arranged. In this case, the condenser optical systems 10 will condense the light from the secondary light source formed in the position of the aperture diaphragm 9, a lighting field diaphragm will be illuminated in superposition, and a relay optical system will form the image of the opening of a lighting field diaphragm on the mask 11.

[0091]In an above-mentioned embodiment, although two or more element lenses are accumulated and the fly eye lens 8 is formed, it is also possible to make these into a micro fly eye. With a micro fly eye, two or more very small lens sides are provided in a light transmittance state board with techniques, such as etching, at matrix form. Although there is no difference in a function between a fly eye lens and a micro fly eye substantially about the point which forms two or more light source images, the size of the opening of one element lens (very small lens) can be made very small, It is points, like that a manufacturing cost is substantially reducible and thickness of an optical axis direction can be made very thin, and a micro fly eye is advantageous.

[0092]In an above-mentioned embodiment, although the afocal zoom lens 5 as the 1st variable power optical system and the zoom lens 7 as the 2nd variable power optical system are used, magnification can also use the 1st fixed optical system and the 2nd optical system of immobilization of a focal distance, without being limited to this.

[0093]Although the above-mentioned embodiment explained this invention taking the case of the illumination optical device in which deformation illumination like zona-orbicularis Lighting Sub-Division or 4 pole Lighting Sub-Division is possible, this invention can be applied also to the illumination optical device which performs only usual circular Lighting Sub-Division, without being limited to deformation illumination. Although the above-mentioned embodiment explained this invention taking the case of the projection aligner provided with the illumination optical device, it is clear that this invention is applicable to the common illumination optical device for carrying out uniform illumination of the irradiated planes other than a mask.

[0094]Now, in an above-mentioned embodiment, since wavelength, such as a KrF excimer laser (wavelength: 248 nm) and an ArF excimer laser (wavelength: 193 nm), uses not less than 180-nm exposing light as a light source, a diffraction optical element can be formed with silica glass. In using the wavelength of 200 nm or less as exposing light, The silica glass in which the silica glass and fluoride in which a fluorite and fluoride were doped in the diffraction optical element, and hydrogen were doped. Structure determination temperature or less by 1200K And the silica glass whose OH radical concentration is not less than 1000 ppm, Structure determination temperature or less by 1200K And the silica glass whose hydrogen content child concentration is more than 1×10^{17} molecules/cm³, Structure determination temperature or less by 1200K And the silica glass whose level of chlorine is 50 ppm or less, And it is preferred to form with the material in which structure determination temperature is 1200K or less, hydrogen content child concentration is more than 1×10^{17} molecules/cm³, and the level of chlorine is chosen from the group of the silica glass which is 50 ppm or less.

[0095]About the silica glass whose structure determination temperature is 1200K or less and whose OH radical concentration is not less than 1000 ppm. It is indicated by the patent No. 2770224 gazette by applicant of this application, and structure determination temperature or less by 1200K And the silica glass whose hydrogen content child concentration is more than 1×10^{17} molecules/cm³, Structure determination temperature or less by 1200K And the silica glass whose level of chlorine is 50 ppm or less, And structure

determination temperature is indicated by the 1200 according to applicant of this application about silica glass whose hydrogen content child concentration are K or less and is more than 1×10^{17} molecules/cm³ and whose level of chlorine is 50 ppm or less patent No. 2936138 gazette.

[0096]

[Effect of the Invention]As explained above, in the illumination optical device of this invention, deformation illuminations, such as zona-orbicularis Lighting Sub-Division and 4 pole Lighting Sub-Division, and usual circular Lighting Sub-Division can be possible, suppressing a light volume loss good, and miniaturization and reservation of good optical performance can be reconciled. Therefore, in the exposure device incorporating the illumination optical device of this invention, the resolution and the depth of focus of a projection optical system suitable for the minute pattern which should carry out exposure projection can be obtained, and good high projection exposure of a throughput can be performed under high exposure illumination and a good exposing condition. In the exposure method which exposes the pattern of the mask arranged on an irradiated plane using the illumination optical device of this invention on a photosensitive substrate, since projection exposure can be performed under a good exposing condition, a good micro device can be manufactured.

[Translation done.]

*** NOTICES ***

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1]It is a figure showing roughly the composition of the exposure device provided with the illumination optical device concerning the embodiment of this invention.

[Drawing 2]It is a figure explaining an operation of zona-orbicularis Meijo's diffraction optical element 4.

[Drawing 3]Two or more aperture diaphragms are the figures showing roughly the composition of the turret arranged at circumference shape.

[Drawing 4]It is a figure explaining an operation of the afocal zoom lens 5.

[Drawing 5]The light flux which carried out oblique incidence to the entrance plane of the micro fly eye 6 is a figure showing signs that a zona-orbicularis-like radiation field is formed in the entrance plane of the fly eye lens 8.

[Drawing 6]It is a figure explaining the magnification of the afocal zoom lens 5 and the focal distance of the zoom lens 7, the size of the radiation field of the shape of zona orbicularis formed in the entrance plane of the fly eye lens 8, and a relation with form.

[Drawing 7]It is a figure explaining an operation of the diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division.

[Explanations of letters or numerals]

1 Light source

4, 40, and 41 Diffraction optical element

5 Afocal zoom lens

6 and 60 Micro fly eye

7 Zoom lens

8 Fly eye lens

9 Aperture diaphragm

10 Condenser optical systems

11 Mask

12 Projection optical system

13 Wafer

20 Input means

21 Control system

22-26 Drive system

[Translation done.]

*** NOTICES ***

JPO and INPIT are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DESCRIPTION OF DRAWINGS

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1]It is a figure showing roughly the composition of the exposure device provided with the illumination optical device concerning the embodiment of this invention.

[Drawing 2]It is a figure explaining an operation of zona-orbicularis Meijo's diffraction optical element 4.

[Drawing 3]Two or more aperture diaphragms are the figures showing roughly the composition of the turret arranged at circumference shape.

[Drawing 4]It is a figure explaining an operation of the afocal zoom lens 5.

[Drawing 5]The light flux which carried out oblique incidence to the entrance plane of the micro fly eye 6 is a figure showing signs that a zona-orbicularis-like radiation field is formed in the entrance plane of the fly eye lens 8.

[Drawing 6]It is a figure explaining the magnification of the afocal zoom lens 5 and the focal distance of the zoom lens 7, the size of the radiation field of the shape of zona orbicularis formed in the entrance plane of the fly eye lens 8, and a relation with form.

[Drawing 7]It is a figure explaining an operation of the diffraction optical element 40 for 4 pole Lighting Sub-Division.

[Explanations of letters or numerals]

1 Light source

4, 40, and 41 Diffraction optical element

5 Afocal zoom lens

6 and 60 Micro fly eye

7 Zoom lens

8 Fly eye lens

9 Aperture diaphragm

10 Condenser optical systems

11 Mask

12 Projection optical system

13 Wafer

20 Input means

21 Control system

22-26 Drive system

[Translation done.]

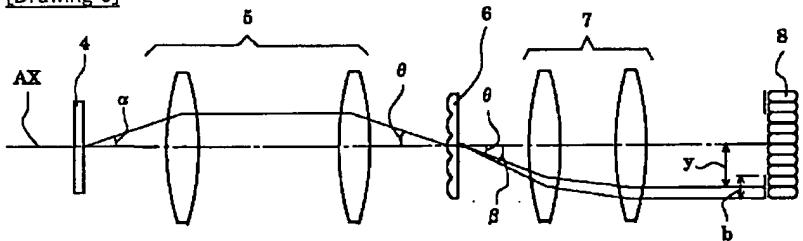
* NOTICES *

JPO and INPI are not responsible for any damages caused by the use of this translation.

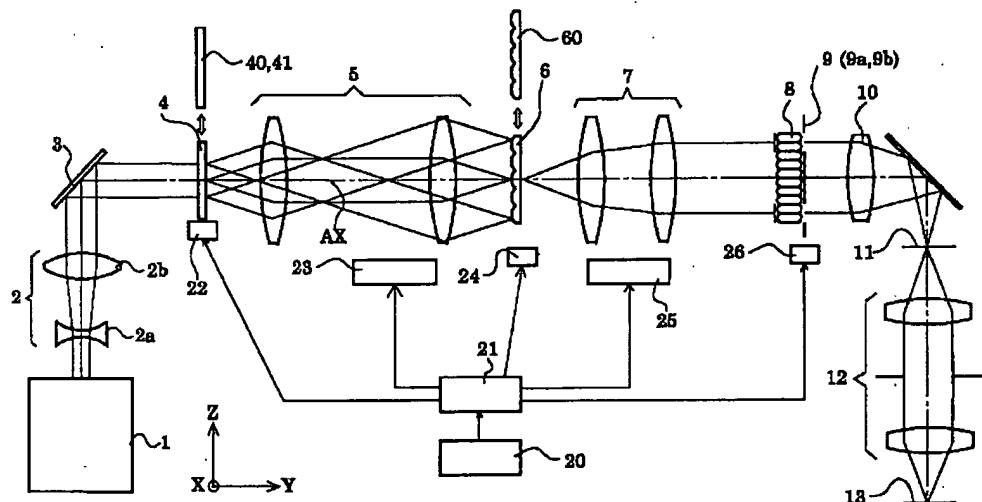
- 1.This document has been translated by computer. So the translation may not reflect the original precisely.
- 2.**** shows the word which can not be translated.
- 3.In the drawings, any words are not translated.

DRAWINGS

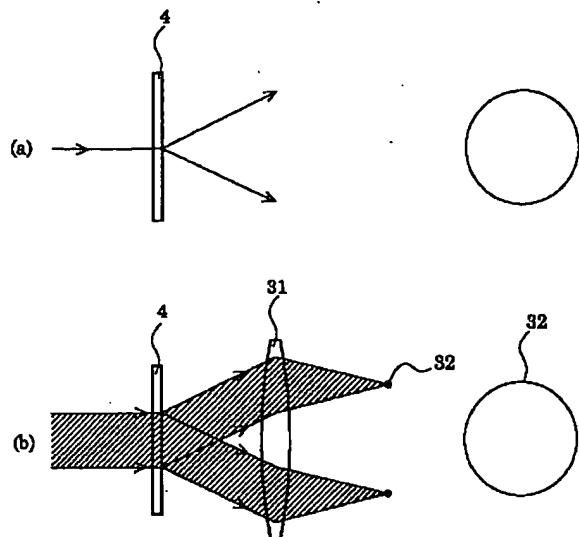
[Drawing 6]



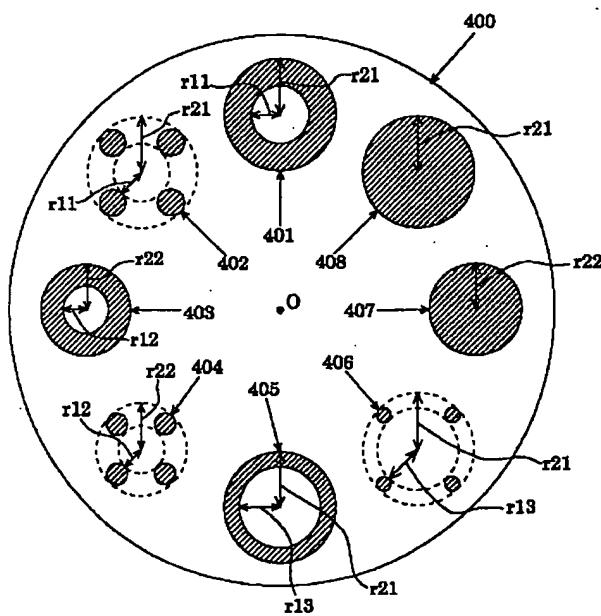
[Drawing 1]



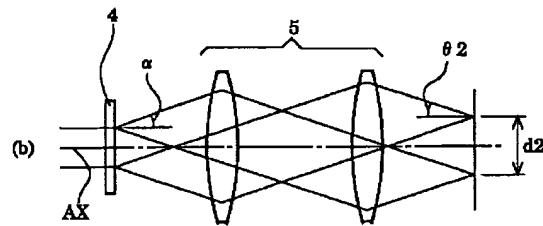
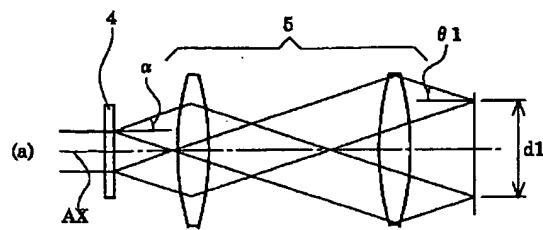
[Drawing 2]



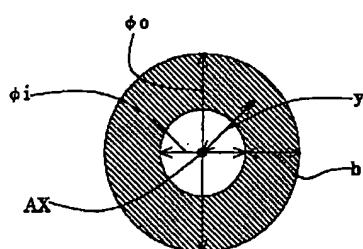
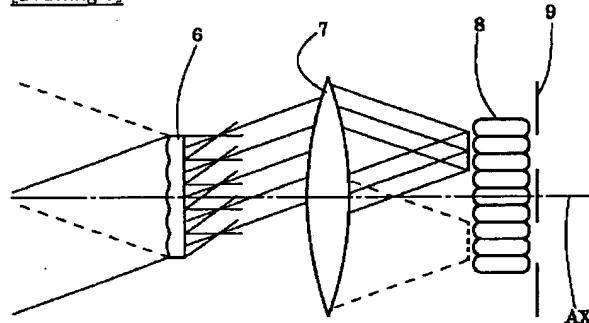
[Drawing 3]



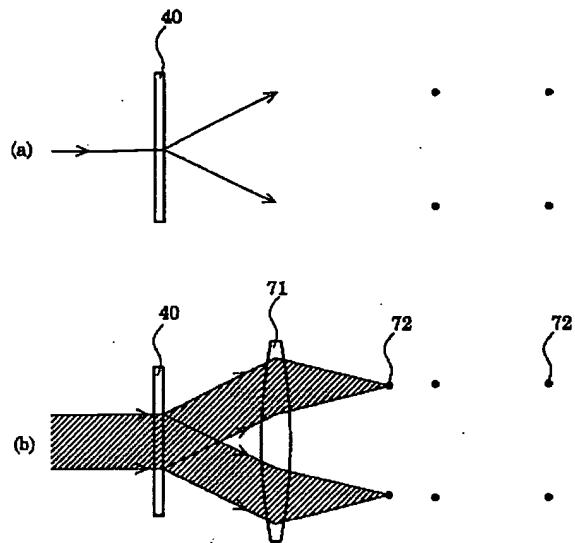
[Drawing 4]



[Drawing 5]



[Drawing 7]



[Translation done.]

(19)日本特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2002-75835

(P2002-75835A)

(43)公開日 平成14年3月15日 (2002.3.15)

(51)Int.Cl.
H 01 L 21/027
G 02 B 19/00
G 03 F 7/20

識別記号
521
521
521

F I
C 02 B 19/00
C 03 F 7/20
H 01 L 21/30

テ-マ-ト*(参考)
2 H 05 2
5 F 04 6
527

審査請求 未請求 請求項の数7 O.L (全14頁)

(21)出願番号

特願2000-260468(P2000-260468)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 谷津 修

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(73)発明者 末永 豊

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74)代理人 100095256

弁理士 山口 孝雄

(22)出願日

平成12年8月30日 (2000.8.30)

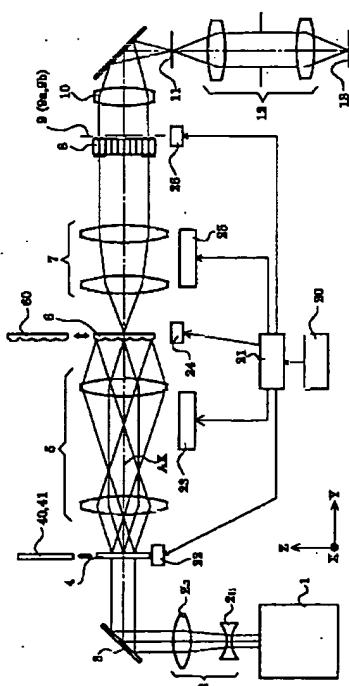
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 照明光学装置および該照明光学装置を備えた露光装置

(57)【要約】

【課題】 コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることのできる照明光学装置。

【解決手段】 光源手段(1)からの光束に基づいて第1多数光源を形成する第1オプティカルインテグレーター(6, 60)と、第1多数光源からの光束に基づいて第2多数光源を形成する第2オプティカルインテグレーター(8)とを備え、第2多数光源からの光束で被照射面(11)を照明する。光源手段からの光束を所定の形状の光束に変換する光束変換素子(4, 40, 41)と、光束変換素子からの光束を集光して光軸(AX)に対してほぼ対称に斜め方向から第1オプティカルインテグレーターへ入射させる第1光学系(5)とを備えている。光束変換素子からの射出光束の開口数が第1多数光源からの光束の開口数よりも大きく設定されている。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光源手段からの光束に基づいて多数の光源からなる第1多数光源を形成するための第1オプティカルインテグレータと、前記第1多数光源からの光束に基づいてより多数の光源からなる第2多数光源を形成するための第2オプティカルインテグレータとを備え、前記第2多数光源からの光束で被照射面を照明する照明光学装置において、前記光源手段からの光束を所定の形状の光束に変換するための光束変換素子と、前記光束変換素子からの光束を集光して、基準光軸に対してほぼ対称に斜め方向から前記第1オプティカルインテグレータへ入射させるための第1光学系とを備え、前記光束変換素子からの射出光束の開口数が、前記第1オプティカルインテグレータにより形成される前記第1多数光源からの光束の開口数よりも大きく設定されていることを特徴とする照明光学装置。

【請求項2】 前記光束変換素子は、照明光路に対して挿脱自在に構成された複数の回折光学素子を有し、前記複数の回折光学素子は、前記光源手段からの平行光束を円形状の光束に変換するための第1回折光学素子と、前記光源手段からの平行光束を輪帶状の光束に変換するための第2回折光学素子と、前記光源手段からの平行光束を前記基準光軸に対して偏心した複数の光束に変換するための第3回折光学素子とを有することを特徴とする請求項1に記載の照明光学装置。

【請求項3】 前記第1光学系は、前記第2多数光源として形成される輪帶状の光源の輪帶比または前記基準光軸に対して偏心した複数の光源からなる複数極状の光源の輪帶比を変更するために倍率が可変の第1変倍光学系を有することを特徴とする請求項1または2に記載の照明光学装置。

【請求項4】 前記第1オプティカルインテグレータと前記第2オプティカルインテグレータとの間の光路中には、前記第1オプティカルインテグレータにより形成される第1多数光源からの光束を前記第2オプティカルインテグレータへ導くための第2光学系が配置され、前記第2光学系は、前記第2多数光源の大きさを変更するために倍率が可変の第2変倍光学系を有することを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1項に記載の照明光学装置。

【請求項5】 前記第1オプティカルインテグレータは、照明光路に対して挿脱自在に構成された複数のマイクロフライアイを有し、前記複数のマイクロフライアイは、第1の焦点距離を有する多数の微小レンズからなる第1マイクロフライアイと、前記第1の焦点距離とは実質的に異なる第2の焦点距離を有する多数の微小レンズからなる第2マイクロフライアイとを有することを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1項に記載の照明光学装置。

【請求項6】 前記第1マイクロフライアイを構成する各微小レンズの焦点距離は、前記第2多数光源として2/3から3/4までの範囲の輪帶比を有する輪帶状の光源または複数極状の光源を形成するための所望の値に設定されていることを特徴とする請求項5に記載の照明光学装置。

【請求項7】 請求項1乃至6のいずれか1項に記載の照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は照明光学装置および該照明光学装置を備えた露光装置に関し、特に半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等のマイクロデバイスをリソグラフィー工程で製造するための露光装置に好適な照明光学装置に関する。

【0002】

【従来の技術】この種の典型的な露光装置においては、光源から射出された光束が、第1オプティカルインテグレータとしてのマイクロフライアイを介して、第1多数光源を形成する。次いで、第1多数光源からの光束が、第2オプティカルインテグレータとしてのフライアイレンズを介して、第2多数光源すなわち二次光源を形成する。二次光源からの光束は、フライアイレンズの後側焦点面の近傍に配置された開口絞りを介して制限された後、コンデンサーレンズに入射する。

【0003】コンデンサーレンズにより集光された光束は、所定のパターンが形成されたマスクを重畳的に照明する。マスクのパターンを透過した光は、投影光学系を介してウェハ上に結像する。こうして、ウェハ上には、マスクパターンが投影露光(転写)される。なお、マスクに形成されたパターンは高集積化されており、この微細パターンをウェハ上に正確に転写するにはウェハ上において均一な照度分布を得ることが不可欠である。

【0004】近年においては、フライアイレンズの射出側に配置された開口絞りの開口部(光透過部)の大きさを変化させることにより、フライアイレンズにより形成される二次光源の大きさを変化させて、照明のコヒーレンシィ σ (σ 値=開口絞り径/投影光学系の瞳径、あるいは σ 値=照明光学系の射出側開口数/投影光学系の入射側開口数)を変化させる技術が注目されている。また、フライアイレンズの射出側に配置された開口絞りの開口部の形状を輪帶状や四つ穴状(すなわち4極状)に設定することにより、フライアイレンズにより形成される二次光源の形状を輪帶状や4極状に制限して、投影光学系の焦点深度や解像力を向上させる技術が注目されている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】この場合、開口絞りに

おける光量損失を良好に回避しつつ二次光源の形状を輪帶状や4極状に制限して変形照明（輪帶照明や4極照明など）および通常の円形照明を行う照明光学装置を実現しようとすると、構成が複雑化および大型化し易いだけでなく、場合によっては製造が現実的に不可能になることも考えられる。

【0006】本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、光量損失を良好に抑えつつ輪帶照明や4極照明などの変形照明および通常の円形照明が可能で、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることのできる、照明光学装置および該照明光学装置を備えた露光装置を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】前記課題を解決するため、本発明では、光源手段からの光束に基づいて多数の光源からなる第1多数光源を形成するための第1オプティカルインテグレータと、前記第1多数光源からの光束に基づいてより多数の光源からなる第2多数光源を形成するための第2オプティカルインテグレータとを備え、前記第2多数光源からの光束で被照射面を照明する照明光学装置において、前記光源手段からの光束を所定の形状の光束に変換するための光束変換素子と、前記光束変換素子からの光束を集光して、基準光軸に対してほぼ対称に斜め方向から前記第1オプティカルインテグレータへ入射させるための第1光学系とを備え、前記光束変換素子からの射出光束の開口数が、前記第1オプティカルインテグレータにより形成される前記第1多数光源からの光束の開口数よりも大きく設定されていることを特徴とする照明光学装置を提供する。

【0008】第1発明の好ましい態様によれば、前記光束変換素子は、照明光路に対して挿脱自在に構成された複数の回折光学素子を有し、前記複数の回折光学素子は、前記光源手段からの平行光束を円形状の光束に変換するための第1回折光学素子と、前記光源手段からの平行光束を輪帶状の光束に変換するための第2回折光学素子と、前記光源手段からの平行光束を前記基準光軸に対して偏心した複数の光束に変換するための第3回折光学素子とを有する。

【0009】また、第1発明の好ましい態様によれば、前記第1光学系は、前記第2多数光源として形成される輪帶状の光源の輪帶比または前記基準光軸に対して偏心した複数の光源からなる複数極状の光源の輪帶比を変更するために倍率が可変の第1変倍光学系を有する。

【0010】さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記第1オプティカルインテグレータと前記第2オプティカルインテグレータとの間の光路中には、前記第1オプティカルインテグレータにより形成される第1多数光源からの光束を前記第2オプティカルインテグレータへ導くための第2光学系が配置され、前記第2光学系は、前記第2多数光源の大きさを変更するために倍率が

可変の第2変倍光学系を有する。

【0011】また、第1発明の好ましい態様によれば、前記第1オプティカルインテグレータは、照明光路に対して挿脱自在に構成された複数のマイクロフライアイを有し、前記複数のマイクロフライアイは、第1の焦点距離を有する多数の微小レンズからなる第1マイクロフライアイと、前記第1の焦点距離とは実質的に異なる第2の焦点距離を有する多数の微小レンズからなる第2マイクロフライアイとを有する。この場合、前記第1マイクロフライアイを構成する各微小レンズの焦点距離は、前記第2多数光源として $2/3$ から $3/4$ までの範囲の輪帶比を有する輪帶状の光源または複数極状の光源を形成するための所望の値に設定されていることが好ましい。

【0012】本発明の別の局面によれば、上述の本発明にかかる照明光学装置と、前記被照射面に配置されたマスクのパターンを感光性基板に投影露光するための投影光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

【0013】

【発明の実施の形態】本発明の典型的な実施形態においては、たとえば回折光学素子のような光束変換素子により、光源手段からの光束を輪帶状または4極状の光束に変換する。この輪帶状または4極状の光束は、所定の第1光学系により集光され、光軸に対してほぼ対称に斜め方向から、マイクロフライアイのような第1オプティカルインテグレータへ入射する。こうして、マイクロフライアイにより第1多数光源が形成される。第1多数光源からの光束は、所定の第2光学系を介した後、フライアイレンズのような第2オプティカルインテグレータにより、第2多数光源すなわち輪帶状または4極状の二次光源を形成する。

【0014】本発明では、光束変換素子としての回折光学素子からの射出光束の開口数を、第1オプティカルインテグレータとしてのマイクロフライアイにより形成される第1多数光源からの光束の開口数よりも大きく設定している。回折光学素子からの射出光束の開口数を第1多数光源からの光束の開口数よりも大きく設定することにより、詳細については後述するように、第1光学系および第2光学系の大型化を回避し、回折光学素子、マイクロフライアイおよび第2光学系の製造が困難になるのを回避することができる。

【0015】その結果、本発明の照明光学装置では、光量損失を良好に抑えつつ輪帶照明や4極照明などの変形照明および通常の円形照明が可能で、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることができる。したがって、本発明の照明光学装置を組み込んだ露光装置では、露光投影すべき微細パターンに適した投影光学系の解像度および焦点深度を得ることができ、高い露光照度および良好な露光条件のもとで、スループットの高い良好な投影露光を行うことができる。また、本発明の照明

光学装置を用いて被照射面上に配置されたマスクのパターンを感光性基板上に露光する露光方法では、良好な露光条件のもとで投影露光を行うことができるので、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【0016】本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。図1は、本発明の実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。図1において、感光性基板であるウェハの法線方向に沿ってZ軸を、ウェハ面内において図1の紙面に平行な方向にY軸を、ウェハ面内において図1の紙面に垂直な方向にX軸をそれぞれ設定している。なお、図1では、照明光学装置が輪帶照明を行うように設定されている。

【0017】図1の露光装置は、露光光（照明光）を供給するための光源1として、たとえば248 nm (KrF) または193 nm (ArF) の波長の光を供給するエキシマレーザー光源を備えている。光源1からZ方向に沿って射出されたほぼ平行な光束は、X方向に沿って細長く伸びた矩形状の断面を有し、一対のシリンドリカルレンズ2aおよび2bからなるビームエキスパンダー2に入射する。各シリンドリカルレンズ2aおよび2bは、図1の紙面内（YZ平面内）において負の屈折力および正の屈折力をそれぞれ有し、光軸AXを含んで紙面と直交する面内（XZ平面内）において平行平面板として機能する。したがって、ビームエキスパンダー2に入射した光束は、図1の紙面内において拡大され、所定の矩形状の断面を有する光束に整形される。

【0018】整形光学系としてのビームエキスパンダー2を介したほぼ平行な光束は、折り曲げミラー3でY方向に偏向された後、輪帶照明用の回折光学素子（DOE）4に入射する。一般に、回折光学素子は、ガラス基板に露光光（照明光）の波長程度のピッチを有する段差を形成することによって構成され、入射ビームを所望の角度に回折する作用を有する。輪帶照明用の回折光学素子4は、図2(a)に示すように、光軸AXと平行に垂直入射した細い光束を、1つの所定の発散角にしたがって放射状に発散させる。換言すると、回折光学素子4に光軸AXに沿って垂直入射した細い光束は、光軸AXを中心として等角度であらゆる方向に沿って回折される。その結果、回折光学素子4に垂直入射した細い光束は、リング状の断面を有する発散光束に変換される。

【0019】したがって、図2(b)に示すように、回折光学素子4に対して太い平行光束が垂直入射すると、輪帶状の光束に変換された後、回折光学素子4の後方に配置されたレンズ31の焦点位置に、リング状の像（リング状の光源像）32を形成する。すなわち、回折光学素子4は、ファーフィールド（またはフランホーファー回折領域）に、リング状の光強度分布を形成する。また、レンズ31は、ファーフィールド（またはフランホーファー回折領域）に形成されるリング状の光強度分布を、その後側焦点面上に形成させる。このように、回

折光学素子4は、光源1からの光束を実質的に輪帶状の光束に変換するための光束変換素子を構成している。

【0020】なお、回折光学素子4は、照明光路に対して挿脱自在に構成され、4極照明用の回折光学素子40や通常円形照明用の回折光学素子41と切り換え可能に構成されている。4極照明用の回折光学素子40および通常円形照明用の回折光学素子41の構成および作用については後述する。ここで、輪帶照明用の回折光学素子4と4極照明用の回折光学素子40と通常円形照明用の回折光学素子41との間の切り換えは、制御系21からの指令に基づいて動作する第1駆動系22により行われる。

【0021】回折光学素子4を介して形成された輪帶状の光束は、アフォーカルズームレンズ5に入射する。アフォーカルズームレンズ5は、回折光学素子4の回折面と後述するマイクロフライアイ6の入射面とを光学的にほぼ共役な関係に維持し、且つアフォーカル系（無焦点光学系）を維持しながら、所定の範囲で倍率を連続的に変化させることができるように構成されている。ここで、アフォーカルズームレンズ5の倍率変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する第2駆動系23により行われる。

【0022】回折光学素子4を介して形成された輪帶状の光束は、アフォーカルズームレンズ5に入射し、その瞳面にリング状の光源像を形成する。このリング状の光源像からの光は、ほぼ平行光束となってアフォーカルズームレンズ5から射出され、マイクロフライアイ6に入射する。このとき、マイクロフライアイ6の入射面には、光軸AXに対してほぼ対称に斜め方向から光束が入射する。マイクロフライアイ6は、稠密に且つ縦横に配列された多数の正六角形状の正屈折力を有する微小レンズからなる光学素子である。一般に、マイクロフライアイは、たとえば平行平面ガラス板にエッティング処理を施して微小レンズ群を形成することによって構成される。

【0023】ここで、マイクロフライアイを構成する各微小レンズは、フライアイレンズを構成する各レンズエレメントよりも微小である。また、マイクロフライアイは、互いに隔絶されたレンズエレメントからなるフライアイレンズとは異なり、多数の微小レンズが互いに隔絶されることなく一体的に形成されている。しかしながら、正屈折力を有するレンズ要素が縦横に配置されている点でマイクロフライアイはフライアイレンズと同じである。なお、図1では、図面の明瞭化のために、マイクロフライアイ6を構成する微小レンズの数を実際よりも非常に少なく設定している。

【0024】したがって、マイクロフライアイ6に入射した光束は多数の微小レンズにより二次元的に分割され、各微小レンズの後側焦点面にはそれぞれ1つのリング状の光源（集光点）が形成される。このように、マイクロフライアイ6は、光源1からの光束に基づいて多数

の光源からなる第1多数光源を形成するための第1オプティカルインテグレータを構成している。

【0025】なお、マイクロフライアイ6は、照明光路に対して挿脱自在に構成され、且つ微小レンズの焦点距離がマイクロフライアイ6とは異なるマイクロフライアイ60と切り換え可能に構成されている。マイクロフライアイ6とマイクロフライアイ60との間の切り換えは、制御系21からの指令に基づいて動作する第3駆動系24により行われる。

【0026】マイクロフライアイ6の後側焦点面に形成された多数の光源からの光束は、ズームレンズ7を介して、第2オプティカルインテグレータとしてのフライアイレンズ8を重畠的に照明する。なお、ズームレンズ7は、所定の範囲で焦点距離を連続的に変化させることのできるリレー光学系であって、マイクロフライアイ6の後側焦点面とフライアイレンズ8の後側焦点面とを光学的にはほぼ共役に結んでいる。換言すると、ズームレンズ7は、マイクロフライアイ6の後側焦点面とフライアイレンズ8の入射面とを実質的にフーリエ変換の関係に結んでいる。

【0027】したがって、マイクロフライアイ6の後側焦点面に形成された多数のリング状の光源からの光束は、ズームレンズ7の後側焦点面に、ひいてはフライアイレンズ8の入射面に、光軸AXを中心とした輪帶状の照野を形成する。この輪帶状の照野の大きさは、ズームレンズ7の焦点距離に依存して変化する。なお、ズームレンズ7の焦点距離の変化は、制御系21からの指令に基づいて動作する第4駆動系25により行われる。

【0028】フライアイレンズ8は、正の屈折力を有する多数のレンズエレメントを稠密に且つ縦横に配列することによって構成されている。なお、フライアイレンズ8を構成する各レンズエレメントは、マスク上において形成すべき照野の形状（ひいてはウェハ上において形成すべき露光領域の形状）と相似な矩形状の断面を有する。また、フライアイレンズ8を構成する各レンズエレメントの入射側の面は入射側に凸面を向けた球面状に形成され、射出側の面は射出側に凸面を向けた球面状に形成されている。

【0029】したがって、フライアイレンズ8に入射した光束は多数のレンズエレメントにより二次元的に分割され、光束が入射した各レンズエレメントの後側焦点面には多数の光源がそれぞれ形成される。こうして、フライアイレンズ8の後側焦点面には、フライアイレンズ8への入射光束によって形成される照野とほぼ同じ光強度分布を有する輪帶状の実質的な面光源（以下、「二次光源」という）が形成される。このように、フライアイレンズ8は、第1オプティカルインテグレータであるマイクロフライアイ6の後側焦点面に形成された第1多数光源からの光束に基づいてより多数の光源からなる第2多数光源を形成するための第2オプティカルインテグレ

タを構成している。

【0030】フライアイレンズ8の後側焦点面に形成された輪帶状の二次光源からの光束は、その近傍に配置された開口絞り9に入射する。この開口絞り9は、光軸AXに平行な所定の軸線回りに回転可能なターレット（回転板：図1では不図示）上に支持されている。

【0031】図3は、複数の開口絞りが円周状に配置されたターレットの構成を概略的に示す図である。図3に示すように、ターレット基板400には、図中斜線で示す光透過域を有する8つの開口絞りが円周方向に沿って設けられている。ターレット基板400は、その中心点Oを通り光軸AXに平行な軸線回りに回転可能に構成されている。したがって、ターレット基板400を回転させることにより、8つの開口絞りから選択された1つの開口絞りを照明光路中に位置決めすることができる。なお、ターレット基板400の回転は、制御系21からの指令に基づいて動作する第5駆動系26により行われる。

【0032】ターレット基板400には、輪帶比の異なる3つの輪帶開口絞り401、403および405が形成されている。ここで、輪帶開口絞り401は、 r_{11}/r_{21} の輪帶比を有する輪帶状の透過領域を有する。輪帶開口絞り403は、 r_{12}/r_{22} の輪帶比を有する輪帶状の透過領域を有する。輪帶開口絞り405は、 r_{13}/r_{21} の輪帶比を有する輪帶状の透過領域を有する。

【0033】また、ターレット基板400には、輪帶比の異なる3つの4極開口絞り402、404および406が形成されている。ここで、4極開口絞り402は、 r_{11}/r_{21} の輪帶比を有する輪帶状領域内において4つの偏心した円形透過領域を有する。4極開口絞り404は、 r_{12}/r_{22} の輪帶比を有する輪帶状領域内において4つの偏心した円形透過領域を有する。4極開口絞り406は、 r_{13}/r_{21} の輪帶比を有する輪帶状領域内において4つの偏心した円形透過領域を有する。

【0034】さらに、ターレット基板400には、大きさ（口径）の異なる2つの円形開口絞り407および408が形成されている。ここで、円形開口絞り407は $2r_{22}$ の大きさの円形透過領域を有し、円形開口絞り408は $2r_{21}$ の大きさの円形透過領域を有する。

【0035】したがって、3つの輪帶開口絞り401、403および405のうちの1つの輪帶開口絞りを選択して照明光路内に位置決めすることにより、3つの異なる輪帶比を有する輪帶光束を正確に制限（規定）して、輪帶比の異なる3種類の輪帶照明を行うことができる。また、3つの4極開口絞り402、404および406のうちの1つの4極開口絞りを選択して照明光路内に位置決めすることにより、3つの異なる輪帶比を有する4つの偏心光束を正確に制限して、輪帶比の異なる3種類

の4極照明を行うことができる。さらに、2つの円形開口絞り407および408のうちの1つの円形開口絞りを選択して照明光路内に位置決めすることにより、 σ 値の異なる2種類の通常円形照明を行うことができる。

【0036】図1では、フライアイレンズ8の後側焦点面に輪帶状の二次光源が形成されるので、開口絞り9として3つの輪帶開口絞り401、403および405から選択された1つの輪帶開口絞りが用いられている。ただし、図3に示すターレットの構成は例示的であって、配置される開口絞りの種類および数はこれに限定されることはない。また、ターレット方式の開口絞りに限定されることなく、光透過領域の大きさおよび形状を適宜変更することの可能な開口絞りを照明光路内に固定的に取り付けてもよい。さらに、2つの円形開口絞り407および408に代えて、円形開口径を連続的に変化させることのできる虹彩絞りを設けることもできる。

【0037】輪帶状の開口部（光透過部）を有する開口絞り9を介した二次光源からの光は、コンデンサー光学系10の集光作用を受けた後、所定のパターンが形成されたマスク11を重畳的に均一照明する。マスク11のパターンを透過した光束は、投影光学系12を介して、感光性基板であるウェハ13上にマスクパターンの像を形成する。こうして、投影光学系12の光軸AXと直交する平面（XY平面）内においてウェハ13を二次元的に駆動制御しながら一括露光またはスキャン露光を行うことにより、ウェハ13の各露光領域にはマスク11のパターンが逐次露光される。

【0038】なお、一括露光では、いわゆるステップ・アンド・リピート方式にしたがって、ウェハの各露光領域に対してマスクパターンを一括的に露光する。この場合、マスク11上での照明領域の形状は正方形に近い矩形状であり、フライアイレンズ8の各レンズエレメントの断面形状も正方形に近い矩形状となる。一方、スキャン露光では、いわゆるステップ・アンド・スキャン方式にしたがって、マスクおよびウェハを投影光学系に対して相対移動させながらウェハの各露光領域に対してマスクパターンをスキャン露光する。この場合、マスク11上での照明領域の形状は短辺と長辺との比がたとえば1:3の矩形状であり、フライアイレンズ8の各レンズエレメントの断面形状もこれと相似な矩形状となる。

【0039】図4は、回折光学素子4からマイクロフライアイ6の入射面までの構成を概略的に示す図であつて、アフォーカルズームレンズ5の作用を説明する図である。図4(a)に示すように、回折光学素子4により光軸AXに対して角度 α の等角度であらゆる方向に沿って回折された光束は、倍率 m_1 のアフォーカルズームレンズ5を介した後、マイクロフライアイ6の入射面に、光軸AXに対して角度 θ_1 の等角度であらゆる方向に沿って斜め入射する。このときに、マイクロフライアイの入射面に形成される照野の大きさは d_1 である。

【0040】ここで、図4(b)に示すように、アフォーカルズームレンズ5の倍率を m_1 から m_2 へ変化させると、回折光学素子4により光軸AXに対して角度 α の等角度であらゆる方向に沿って回折された光束は、倍率 m_2 のアフォーカルズームレンズ5を介した後、マイクロフライアイ6の入射面に光軸AXに対して角度 θ_2 の等角度であらゆる方向に沿って斜め入射する。このときに、マイクロフライアイ6の入射面に形成される照野の大きさは d_2 である。

【0041】ここで、マイクロフライアイ6の入射面への光束の入射角度 θ_1 および θ_2 、並びにマイクロフライアイ6の入射面に形成される照野の大きさ d_1 および d_2 と、アフォーカルズームレンズ5の倍率 m_1 および m_2 との間には、次の式(1)および(2)に示す関係が成立する。

$$\theta_2 = (m_1/m_2) \cdot \theta_1 \quad (1)$$

$$d_2 = (m_2/m_1) \cdot d_1 \quad (2)$$

【0042】式(1)を参照すると、アフォーカルズームレンズ5の倍率 m を連続的に変化させることにより、マイクロフライアイ6の入射面への光束の入射角度 θ を連続的に変化させることができることがわかる。

【0043】図5は、マイクロフライアイ6から開口絞り9までの構成を概略的に示す図であつて、マイクロフライアイ6の入射面に斜め入射した光束がフライアイレンズ8の入射面に輪帶状の照野を形成する様子を示す図である。図5(a)において実線で示すように、マイクロフライアイ6の入射面に対して所定の方向から所定の角度で斜め入射した光束は、各微小レンズを介して結像した後も角度を保持しながらズームレンズ7へ斜め入射し、フライアイレンズ8の入射面において光軸AXから所定の距離だけ偏心した位置に所定の幅を有する照野を形成する。

【0044】實際には、図5(a)において破線で示すように、マイクロフライアイ6の入射面には光軸AXに対してほぼ対称に斜め方向から光束が入射する。換言すると、光軸AXを中心として等角度であらゆる方向に沿って光束が斜め入射する。したがって、フライアイレンズ8の入射面には、図5(b)に示すように、光軸AXを中心とした輪帶状の照野が形成されることになる。また、フライアイレンズ8の後側焦点面には、入射面に形成された照野と同じ輪帶状の二次光源が形成されることになる。

【0045】一方、上述したように、フライアイレンズ8の後側焦点面の近傍に配置された輪帶開口絞り9には、輪帶状の二次光源に対応する輪帶状の開口部（図3の401、403、405を参照）が形成されている。こうして、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく輪帶状の二次光源を形成することができ、その結果二次光源からの光束を制限する輪帶開口絞り9においてほとんど光量損失することなく輪帶照明を

行うことができる。

【0046】図6は、回折光学素子4からフライアイレンズ8の入射面までの構成を概略的に示す図であって、アフォーカルズームレンズ5の倍率およびズームレンズ7の焦点距離とフライアイレンズ8の入射面に形成される輪帯状の照野の大きさおよび形状との関係を説明する図である。図6において、回折光学素子4から回折角度 α で射出された光線は、倍率mのアフォーカルズームレンズ5を介した後、光軸AXに対して角度 θ でマイクロフライアイ6に入射する。すなわち、回折光学素子4からの射出光束の開口数NA1は、 $NA_1 = n \cdot \sin \alpha$ (n は空間の屈折率) で表される。

【0047】マイクロフライアイ6は、サイズ(正六角形状の各微小レンズに外接する円の直径)がaで焦点距離がf1の微小レンズから構成されている。マイクロフライアイ6により形成された各光源から射出角度 θ で射出された中心光線は、焦点距離f2のズームレンズ7を介してフライアイレンズ8の入射面に達する。同様に、各光源から中心光線に対して所定の角度範囲(最大射出角度 β)で射出された光線群もフライアイレンズ8の入射面に達する。こうして、フライアイレンズ8の入射面における光束の入射範囲は、光軸AXからyの高さを中心として幅bを有する範囲となる。すなわち、図5(b)に示すように、フライアイレンズ8の入射面に形成される照野、ひいてはフライアイレンズ8の後側焦点面に形成される二次光源は、光軸AXからの高さyを有し且つ幅bを有することになる。

【0048】ところで、マイクロフライアイ6へ平行光束が入射する場合には、形成される各光源からの射出光

$$\begin{aligned} A &= \phi_i / \phi_o = (2y - b) / (2y + b) \\ &= \{2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) - (f_2/f_1) \cdot a\} \\ &\quad / \{2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) + (f_2/f_1) \cdot a\} \\ &= \{2\sin(\alpha/m) - a/f_1\} \\ &\quad / \{2\sin(\alpha/m) + a/f_1\} \\ &= \{\sin(\alpha/m) - \beta\} / \{\sin(\alpha/m) + \beta\} \quad (7) \end{aligned}$$

【0053】また、輪帯状の二次光源の外径 ϕ_o は、次の式(8)で表される。

$$\begin{aligned} \phi_o &= 2y + b \\ &= 2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) + (a/f_1) \cdot f_2 \\ &= 2f_2 \cdot \sin(\alpha/m) + 2\beta \cdot f_2 \quad (8) \end{aligned}$$

【0054】式(8)を変形すると、次の式(9)に示す関係が得られる。

$$f_2 = \phi_o / \{2 \sin(\alpha/m) + (a/f_1)\} \quad (9)$$

こうして、式(4)および(5)を参照すると、ズームレンズ7の焦点距離f2が変化することなくアフォーカルズームレンズ5の倍率mだけが変化すると、輪帯状の二次光源の幅bが変化することなくその高さyだけが変化することがわかる。すなわち、アフォーカルズームレンズ5の倍率mだけを変化させることにより、輪帯状の二次光源の幅bを変化させることなくその大きさ(外径 ϕ_o)およびその形状(輪帯比A)をともに変更するこ

とができる。

束の開き角の半角を γ とすると、マイクロフライアイ6の開口数は、 $n \cdot \sin \gamma$ で表される。本実施形態では、マイクロフライアイ6の入射面に入射角度 θ で斜め方向から光束が入射する(換言すると収斂光束が入射する)ため、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の最大射出角度 β は、マイクロフライアイ6への入射角度 θ と、上述したマイクロフライアイ6の開口数 $n \cdot \sin \gamma$ に対応する角度 γ との総和で表される。そして、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の開口数NA2は、 $NA_2 = n \cdot \sin \beta$ で表される。

【0049】ここで、回折光学素子4からの射出光束の開き角の半角(回折角) α とマイクロフライアイ6への入射角度 θ との間には、次の式(3)で示す関係が成立する。

$$\theta = (1/m) \cdot \alpha \quad (3)$$

【0050】また、輪帯状の二次光源の高さyおよびその幅bは、次の式(4)および(5)でそれぞれ表される。

$$y = f_2 \cdot \sin \theta = f_2 \cdot \sin(\alpha/m) \quad (4)$$

$$b = (f_2/f_1) \cdot a \quad (5)$$

【0051】さらに、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の最大射出角度 β は、次の式(6)で表される。

$$\beta = (a/2)/f_1 = (a/f_1)/2 \quad (6)$$

【0052】したがって、輪帯状の二次光源の内径 ϕ_i と外径 ϕ_o との比で規定される輪帯比Aは、次の式(7)で表される。

【数1】

【数2】

とができる。

【0055】また、式(4)および(5)を参照すると、アフォーカルズームレンズ5の倍率mが変化することなくズームレンズ7の焦点距離f2だけが変化すると、輪帯状の二次光源の幅bおよびその高さyがともに焦点距離f2に比例して変化することがわかる。すなわち、ズームレンズ7の焦点距離f2だけを変化させることにより、輪帯状の二次光源の形状(輪帯比A)を変化

させることなくその大きさ（外径 ϕ o）だけを変更することができる。

【0056】さらに、式(7)および(9)を参照すると、一定の大きさの外径 ϕ oに対して式(9)の関係を満たすようにアフォーカルズームレンズ5の倍率mとズームレンズ7の焦点距離f2とを変化させることにより、輪帶状の二次光源の大きさ（外径 ϕ o）を変化させることなくその形状（輪帶比A）だけを変更することができる。これがわかる。

【0057】ところで、回折光学素子4からの射出光束の開き角の半角（回折角） α は、現実的な数値実施例によれば、たとえば4度～7度の範囲内において設定される。これは、 α がたとえば7度よりも大きくなると、回折光学素子4の製造が困難になるとともに、その透過率が低下する傾向が顕著になるためである。また、 α がたとえば7度よりも大きくなると、アフォーカルズームレンズ5の径が大きくなり、ひいては装置が大型化してしまう。

【0058】さらに、上述の式(8)を参考するとわかるように、 α がたとえば7度よりも大きくなると、輪帶状の二次光源の外径 ϕ oを所定の値に保つために、ズームレンズ7の焦点距離f2を小さく設定する必要がある。その結果、ズームレンズ7の所要のFナンバーが小さくなりすぎて、ズームレンズ7の製造が困難になってしまう。一方、上述の式(8)を参考するとわかるように、 α がたとえば4度よりも小さくなると、輪帶状の二次光源の外径 ϕ oを所定の値に保つために、ズームレンズ7の焦点距離f2を大きく設定する必要がある。その結果、ズームレンズ7の全長が大きくなり、ひいては装置が大型化してしまう。

【0059】次に、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の最大射出角度 β は、現実的な数値実施例によれば、たとえば1度～3度の範囲内において設定される。上述の式(6)を参考するとわかるように、 β がたとえば3度よりも大きくなると、マイクロフライアイ6の各微小レンズの焦点距離f1を小さく設定する必要がある。その結果、各微小レンズに所要の曲率を付与することが困難になり、ひいてはマイクロフライアイ6の製造が困難になってしまう。

【0060】また、上述の式(8)を参考するとわかるように、 β がたとえば3度よりも大きくなると、輪帶状の二次光源の外径 ϕ oを所定の値に保つために、ズームレンズ7の焦点距離f2を小さく設定する必要がある。その結果、ズームレンズ7の所要のFナンバーが小さくなりすぎて、ズームレンズ7の製造が困難になってしまう。一方、上述の式(8)を参考するとわかるように、 β がたとえば1度よりも小さくなると、輪帶状の二次光源の外径 ϕ oを所定の値に保つために、ズームレンズ7の焦点距離f2を大きく設定する必要がある。その結果、ズームレンズ7の全長が大きくなり、ひいては装置

が大型化してしまう。

【0061】以上のように、本実施形態の現実的な数値実施例において、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させるには、回折光学素子4からの射出光束の開き角の半角（回折角） α を、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の最大射出角度 β よりも大きく設定することが必要であることがわかる。換言すると、回折光学素子4からの射出光束の開口数NA1 = n · sin α を、マイクロフライアイ6により形成される各光源からの射出光束の開口数NA2 = n · sin β よりも大きく設定することにより、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることができる。

【0062】ところで、現実的な数値実施例によれば、マイクロフライアイ6の各微小レンズの焦点距離f1を3.3mm程度に設定することにより、二次光源の輪帶比をたとえば1/2～2/3の範囲に亘って連続的に変化させることができくなる。また、マイクロフライアイ6の各微小レンズの焦点距離f1を5.0mm程度に設定することにより、二次光源の輪帶比をたとえば2/3～3/4の範囲に亘って連続的に変化させることができくなる。そこで、本実施形態では、たとえば焦点距離f1が3.3mm程度のマイクロフライアイ6と焦点距離f1が5.0mm程度のマイクロフライアイ60とを切り換える構成している。

【0063】したがって、マイクロフライアイ6が照明光路中に設定された図1の状態では、二次光源の輪帶比をたとえば1/2～2/3の範囲に亘って連続的に変化させることができある。また、マイクロフライアイ6に代えてマイクロフライアイ60を照明光路中に設定すると、二次光源の輪帶比をたとえば2/3～3/4の範囲に亘って連続的に変化させることができとなる。こうして、本実施形態では、二次光源の輪帶比をたとえば1/2～3/4の範囲に亘って連続的に変化させることができである。

【0064】ところで、前述したように、回折光学素子4は、照明光路に対して挿脱自在に構成され、且つ4極照明用の回折光学素子40や通常円形照明用の回折光学素子41と切り換える構成されている。以下、回折光学素子4に代えて回折光学素子40を照明光路中に設定することによって得られる4極照明について簡単に説明する。

【0065】4極照明用の回折光学素子40は、図7(a)に示すように、光軸AXと平行に垂直入射した細い光束を、所定の射出角にしたがって進む4つの光束に変換する。換言すると、光軸AXに沿って垂直入射した細い光束は、光軸AXを中心として等角度で特定の4つの方向に沿って回折され、4つの細い光束となる。さらに詳細には、回折光学素子40に垂直入射した細い光束は4つの光束に変換され、回折光学素子40と平行な後方の面を通過する4つの光束の通過中心点を結ぶ四角形

は正方形となり、その正方形の中心は回折光学素子40への入射軸線上に存在することになる。

【0066】したがって、図7(b)に示すように、回折光学素子40に対して太い平行光束が垂直入射すると、4つの光束に変換され、回折光学素子40の後方に配置されたレンズ71の焦点位置には、やはり4つの点像(点状の光源像)72が形成される。したがって、回折光学素子40を介した光束は、アフォーカルズームレンズ5の瞳面に4つの点像を形成する。この4つの点像からの光は、ほぼ平行光束となってアフォーカルズームレンズ5から射出され、マイクロフライアイ6(または60)の後側焦点面に第1多数光源を形成する。

【0067】マイクロフライアイ6(または60)の後側焦点面に形成された第1多数光源からの光束は、ズームレンズ7を介してフライアイレンズ8の入射面に、光軸AXに対して対称的に偏心した4つの照野からなる4極状の照野を形成する。その結果、フライアイレンズ8の後側焦点面には、入射面に形成された照野とほぼ同じ光強度を有する二次光源、すなわち光軸AXに対して対称的に偏心した4つの面光源からなる4極状の二次光源が形成される。

【0068】なお、回折光学素子4から回折光学素子40への切り換えに対応して、輪帶開口絞り9から開口絞り9aへの切り換えが行われる。開口絞り9aは、図3に示す3つの4極開口絞り402、404および406から選択された1つの4極開口絞りである。このように、4極照明用の回折光学素子40を用いる場合も、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく4極状の二次光源を形成することができ、その結果二次光源からの光束を制限する開口絞り9aにおける光量損失を良好に抑えつつ4極照明を行うことができる。

【0069】なお、4極状の二次光源の外径(大きさ)および輪帶比(形状)を、輪帶状の二次光源と同様に定義することができる。すなわち、4極状の二次光源の外径は、4つの面光源に外接する円の直径である。また、4極状の二次光源の輪帶比は、4つの面光源に外接する円の直径すなわち外径に対する、4つの面光源に内接する円の直径すなわち内径の比である。

【0070】こうして、輪帶照明の場合と同様に、アフォーカルズームレンズ5の倍率mを変化させることにより、4極状の二次光源の外径φoおよび輪帶比Aをともに変更することができる。また、ズームレンズ7の焦点距離f2を変化させることにより、4極状の二次光源の輪帶比Aを変更することなくその外径φoを変更することができる。その結果、アフォーカルズームレンズ5の倍率mとズームレンズ7の焦点距離f2とを適宜変化させることにより、4極状の二次光源の外径φoを変化させることなくその輪帶比Aだけを変更することができる。

【0071】次いで、回折光学素子4または40に代え

て円形照明用の回折光学素子41を照明光路中に設定することによって得られる通常円形照明について説明する。円形照明用の回折光学素子41は、入射した矩形状の光束を円形状の光束に変換する機能を有する。したがって、回折光学素子41により形成された円形光束は、アフォーカルズームレンズ5によりその倍率に応じて拡大(または縮小)され、マイクロフライアイ6(または60)に入射する。こうして、マイクロフライアイ6(または60)の後側焦点面には、第1多数光源が形成される。

【0072】マイクロフライアイ6(または60)の後側焦点面に形成された第1多数光源からの光束は、ズームレンズ7を介して、フライアイレンズ8の入射面において光軸AXを中心とした円形状の照野を形成する。その結果、フライアイレンズ8の後側焦点面にも、光軸AXを中心とした円形状の二次光源が形成される。この場合、ズームレンズ7の焦点距離f2を変化させることにより、円形状の二次光源の外径を適宜変更することができる。

【0073】なお、回折光学素子4または40から円形照明用の回折光学素子41への切り換えに対応して、輪帶開口絞り9または4極開口絞り9aから円形開口絞り9bへの切り換えが行われる。円形開口絞り9bは、図3に示す2つの円形開口絞り407および408から選択された1つの円形開口絞りであり、円形状の二次光源に対応する大きさの開口部を有する。このように、円形照明用の回折光学素子41を用いることにより、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく円形状の二次光源を形成し、二次光源からの光束を制限する開口絞りにおける光量損失を良好に抑えつつ通常円形照明を行うことができる。

【0074】以下、本実施形態における照明の切り換え動作などについて具体的に説明する。まず、ステップ・アンド・リピート方式またはステップ・アンド・スキャン方式にしたがって順次露光すべき各種のマスクに関する情報などが、キーボードなどの入力手段20を介して制御系21に入力される。制御系21は、各種のマスクに関する最適な線幅(解像度)、焦点深度等の情報を内部のメモリ一部に記憶しており、入力手段20からの入力に応答して第1駆動系22～第5駆動系26に適当な制御信号を供給する。

【0075】すなわち、最適な解像度および焦点深度のもとで輪帶照明する場合、第1駆動系22は、制御系21からの指令に基づいて、輪帶照明用の回折光学素子4を照明光路中に位置決めする。そして、フライアイレンズ8の後側焦点面において所望の大きさ(外径)および形状(輪帶比)を有する輪帶状の二次光源を得るために、第2駆動系23は制御系21からの指令に基づいてアフォーカルズームレンズ5の倍率を設定し、第4駆動系25は制御系21からの指令に基づいてズームレンズ

7の焦点距離を設定する。また、光量損失を良好に抑えた状態で輪帶状の二次光源を制限するために、第5駆動系26は制御系21からの指令に基づいてターレットを回転させ、所望の輪帶開口絞りを照明光路中に位置決めする。こうして、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく輪帶状の二次光源を形成することができます、その結果二次光源からの光束を制限する開口絞りにおいてほとんど光量損失することなく輪帶照明を行うことができる。

【0076】さらに、必要に応じて、第2駆動系23によりアフォーカルズームレンズ5の倍率を変化させたり、第3駆動系24によりマイクロフライアイ6と60とを切り換えたり、第4駆動系25によりズームレンズ7の焦点距離を変化させることにより、フライアイレンズ8の後側焦点面に形成される輪帶状の二次光源の大きさおよび輪帶比を適宜変更することができる。この場合、輪帶状の二次光源の大きさおよび輪帶比の変化に応じてターレットが回転し、所望の大きさおよび輪帶比を有する輪帶開口絞りが選択されて照明光路中に位置決めされる。こうして、輪帶状の二次光源の形成およびその制限においてほとんど光量損失することなく、輪帶状の二次光源の大きさおよび輪帶比を適宜変化させて多様な輪帶照明を行うことができる。

【0077】また、最適な解像度および焦点深度のもとで4極照明する場合、第1駆動系22は、制御系21からの指令に基づいて、4極照明用の回折光学素子40を照明光路中に位置決めする。そして、フライアイレンズ8の後側焦点面において所望の大きさ（外径）および形状（輪帶比）を有する4極状の二次光源を得るために、第2駆動系23は制御系21からの指令に基づいてアフォーカルズームレンズ5の倍率を設定し、第4駆動系25は制御系21からの指令に基づいてズームレンズ7の焦点距離を設定する。また、光量損失を良好に抑えた状態で4極状の二次光源を制限するために、第5駆動系26は制御系21からの指令に基づいてターレットを回転させ、所望の4極開口絞りを照明光路中に位置決めする。こうして、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく4極状の二次光源を形成することができ、その結果二次光源からの光束を制限する開口絞りにおいて光量損失を良好に抑えつつ4極照明を行うことができる。

【0078】さらに、必要に応じて、第2駆動系23によりアフォーカルズームレンズ5の倍率を変化させたり、第3駆動系24によりマイクロフライアイ6と60とを切り換えたり、第4駆動系25によりズームレンズ7の焦点距離を変化させることにより、フライアイレンズ8の後側焦点面に形成される4極状の二次光源の大きさおよび輪帶比を適宜変更することができる。この場合、4極状の二次光源の大きさおよび輪帶比の変化に応じてターレットが回転し、所望の大きさおよび輪帶比を

有する4極開口絞りが選択されて照明光路中に位置決めされる。こうして、4極状の二次光源の形成およびその制限において光量損失を良好に抑えた状態で、4極状の二次光源の大きさおよび輪帶比を適宜変化させて多様な4極照明を行うことができる。

【0079】最後に、最適な解像度および焦点深度のもとで通常の円形照明をする場合、第1駆動系22は、制御系21からの指令に基づいて、通常円形照明用の回折光学素子41を照明光路中に位置決めする。そして、フライアイレンズ8の後側焦点面において所望の大きさ（外径）を有する円形状の二次光源を得るために、第2駆動系23は制御系21からの指令に基づいてアフォーカルズームレンズ5の倍率を設定し、第4駆動系25が制御系21からの指令に基づいてズームレンズ7の焦点距離を設定する。

【0080】また、光量損失を良好に抑えた状態で円形状の二次光源を制限するために、第5駆動系26は制御系21からの指令に基づいてターレットを回転させ、所望の円形開口絞りを照明光路中に位置決めする。なお、円形開口径を連続的に変化させることのできる虹彩絞りを用いる場合には、第5駆動系26は制御系21からの指令に基づいて虹彩絞りの開口径を設定する。こうして、光源1からの光束に基づいてほとんど光量損失することなく円形状の二次光源を形成することができ、その結果二次光源からの光束を制限する開口絞りにおいて光量損失を良好に抑えつつ通常円形照明を行うことができる。

【0081】さらに、必要に応じて、第4駆動系25によりズームレンズ7の焦点距離を変化させることにより、フライアイレンズ8の後側焦点面に形成される円形状の二次光源の大きさを適宜変更することができる。この場合、円形状の二次光源の大きさの変化に応じてターレットが回転し、所望の大きさの開口部を有する円形開口絞りが選択されて照明光路中に位置決めされる。こうして、円形状の二次光源の形成およびその制限において光量損失を良好に抑えつつ、 ϕ 値を適宜変化させて多様な通常円形照明を行うことができる。

【0082】以上のように、本実施形態の照明光学装置では、光量損失を良好に抑えつつ輪帶照明や4極照明などの変形照明および通常の円形照明が可能で、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることができる。したがって、本実施形態の露光装置では、露光投影すべき微細パターンに適した投影光学系の解像度および焦点深度を得ることができ、高い露光照度および良好な露光条件のもとで、スループットの高い良好な投影露光を行うことができる。

【0083】上述の実施形態の露光装置による露光の工程（フォトリソグラフィ工程）を経たウェハは、現像する工程を経てから、現像したレジスト以外の部分を除去するエッティングの工程、エッティングの工程後の不要なレ

ジストを除去するレジスト除去の工程等を経てウェハプロセスが終了する。そして、ウェハプロセスが終了すると、実際の組立工程にて、焼き付けられた回路毎にウェハを切断してチップ化するダイシング、各チップに配線等を付与するボンディング、各チップ毎にパッケージングするパッケージング等の各工程を経て、最終的にデバイスとしての半導体装置（LSI等）が製造される。

【0084】なお、以上の説明では、露光装置を用いたウェハプロセスでのフォトリソグラフィ工程により半導体素子を製造する例を示したが、露光装置を用いたフォトリソグラフィ工程によって、マイクロデバイスとして、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド、撮像素子（CCD等）などを製造することができる。こうして、本実施形態の照明光学装置を用いてマイクロデバイスを製造する露光方法の場合、良好な露光条件のもとで投影露光を行うことができるので、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【0085】なお、上述の実施形態においては、光束変換素子としての回折光学素子4、40および41並びに第1オプティカルインテグレータとしてのマイクロフライアイ6および60を、たとえばターレット方式で照明光路中に位置決めるように構成することができる。また、たとえば公知のスライダ機構を利用して、上述の回折光学素子4、40および41並びにマイクロフライアイ6および60の切り換えを行うこともできる。

【0086】また、上述の実施形態では、マイクロフライアイ6および60を構成する微小レンズの形状を正六角形に設定している。これは、円形状の微小レンズでは、稠密に配列を行うことができず光量損失が発生するため、円形に近い多角形として正六角形を選定しているからである。しかしながら、マイクロフライアイ6および60を構成する各微小レンズの形状はこれに限定されることなく、たとえば矩形状を含む他の適当な形状を用いることができる。また、上述の各実施形態では、マイクロフライアイ6および60を構成する微小レンズの屈折力を正屈折力としているが、この微小レンズの屈折力は負であっても良い。

【0087】さらに、上述の実施形態では、通常の円形照明を行う際に回折光学素子41を照明光路中に位置決めしているが、この回折光学素子41の使用を省略することもできる。また、上述の実施形態では、光束変換素子として回折光学素子を用いているが、これに限定されることなく、たとえばマイクロフライアイや微小レンズアリズムのような屈折光学素子を用いることもできる。ところで、本発明で利用することのできる回折光学素子に関する詳細な説明は、米国特許第5,850,300号公報などに開示されている。

【0088】さらに、上述の実施形態では、フライアイレンズ8の後側焦点面の近傍に、二次光源の光束を制限するための開口絞りを配置している。しかしながら、場

合によっては、フライアイレンズを構成する各レンズエレメントの断面積を十分小さく設定することにより、開口絞りの配置を省略して二次光源の光束を全く制限しない構成も可能である。

【0089】また、上述の実施形態では、変形照明において輪帶状または4極状の二次光源を例示的に形成しているが、光軸に対して偏心した2つの面光源からなる2極状の二次光源や、光軸に対して偏心した8つの面光源からなる8極状の二次光源のような、いわゆる複数極状あるいは多極状の二次光源を形成することもできる。

【0090】なお、上述の実施形態においては、コンデンサー光学系10によって開口絞り9の位置に形成される二次光源からの光を集光して重畳的にマスク11を照明する構成としているが、コンデンサー光学系10とマスク11との間に、照明視野絞り（マスクブラインド）と、この照明視野絞りの像をマスク11上に形成するリレー光学系とを配置しても良い。この場合、コンデンサー光学系10は、開口絞り9の位置に形成される二次光源からの光を集光して重畳的に照明視野絞りを照明することになり、リレー光学系は、照明視野絞りの開口部の像をマスク11上に形成することになる。

【0091】また、上述の実施形態においては、フライアイレンズ8を、複数の要素レンズを重ねて形成しているが、これらをマイクロフライアイとしても可能である。マイクロフライアイとは、光透過性基板にエッチングなどの手法により複数の微小レンズ面をマトリックス状に設けたものである。複数の光源像を形成する点に関して、フライアイレンズとマイクロフライアイとの間に機能上の差異は実質的には無いが、1つの要素レンズ（微小レンズ）の開口の大きさを極めて小さくできること、製造コストを大幅に削減できること、光軸方向の厚みを非常に薄くできることなどの点で、マイクロフライアイが有利である。

【0092】さらに、上述の実施形態においては、第1変倍光学系としてのアフォーカルズームレンズ5および第2変倍光学系としてのズームレンズ7が用いられているが、これに限定されることなく、倍率が固定の第1光学系および焦点距離が固定の第2光学系を用いることもできる。

【0093】また、上述の実施形態では、輪帶照明や4極照明のような変形照明が可能な照明光学装置を例にとって本発明を説明したが、変形照明に限定されることなく通常の円形照明だけを行う照明光学装置にも本発明を適用することができる。さらに、上述の実施形態では、照明光学装置を備えた投影露光装置を例にとって本発明を説明したが、マスク以外の被照射面を均一照明するための一般的な照明光学装置に本発明を適用することができるることは明らかである。

【0094】さて、上述の実施形態においては、光源としてKrFエキシマレーザ（波長:248nm）やArFエキシ

マレーザ(波長:193nm)等、波長が180nm以上の露光光を用いているため回折光学素子は例えば石英ガラスで形成することができる。なお、露光光として200nm以下の波長を用いる場合には、回折光学素子を螢石、フッ素がドープされた石英ガラス、フッ素及び水素がドープされた石英ガラス、構造決定温度が1200K以下で且つOH基濃度が1000ppm以上である石英ガラス、構造決定温度が1200K以下で且つ水素分子濃度が 1×10^{17} molecules/cm³以上である石英ガラス、構造決定温度が1200K以下でかつ塩素濃度が50ppm以下である石英ガラス、及び構造決定温度が1200K以下で且つ水素分子濃度が 1×10^{17} molecules/cm³以上で且つ塩素濃度が50ppm以下である石英ガラスのグループから選択される材料で形成することが好ましい。

【0095】なお、構造決定温度が1200K以下で且つOH基濃度が1000ppm以上である石英ガラスについては、本願出願人による特許第2770224号公報に開示されており、構造決定温度が1200K以下で且つ水素分子濃度が 1×10^{17} molecules/cm³以上である石英ガラス、構造決定温度が1200K以下でかつ塩素濃度が50ppm以下である石英ガラス、及び構造決定温度が1200K以下で且つ水素分子濃度が 1×10^{17} molecules/cm³以上で且つ塩素濃度が50ppm以下である石英ガラスについては本願出願人による特許第2936138号公報に開示されている。

【0096】

【発明の効果】以上説明したように、本発明の照明光学装置では、光量損失を良好に抑えつつ輪帯照明や4極照明などの変形照明および通常の円形照明が可能で、コンパクト化と良好な光学性能の確保とを両立させることができる。したがって、本発明の照明光学装置を組み込んだ露光装置では、露光投影すべき微細パターンに適した投影光学系の解像度および焦点深度を得ることができ、高い露光照度および良好な露光条件のもとで、スルーブットの高い良好な投影露光を行うことができる。また、本発明の照明光学装置を用いて被照射面上に配置されたマスクのパターンを感光性基板上に露光する露光方法で

は、良好な露光条件のもとで投影露光を行うことができるので、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施形態にかかる照明光学装置を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

【図2】輪帯明用の回折光学素子4の作用を説明する図である。

【図3】複数の開口絞りが円周状に配置されたターレットの構成を概略的に示す図である。

【図4】アフォーカルズームレンズ5の作用を説明する図である。

【図5】マイクロフライアイ6の入射面に斜め入射した光束がフライアイレンズ8の入射面に輪帯状の照野を形成する様子を示す図である。

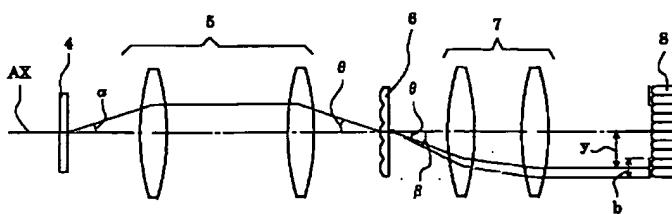
【図6】アフォーカルズームレンズ5の倍率およびズームレンズ7の焦点距離とフライアイレンズ8の入射面に形成される輪帯状の照野の大きさおよび形状との関係を説明する図である。

【図7】4極照明用の回折光学素子40の作用を説明する図である。

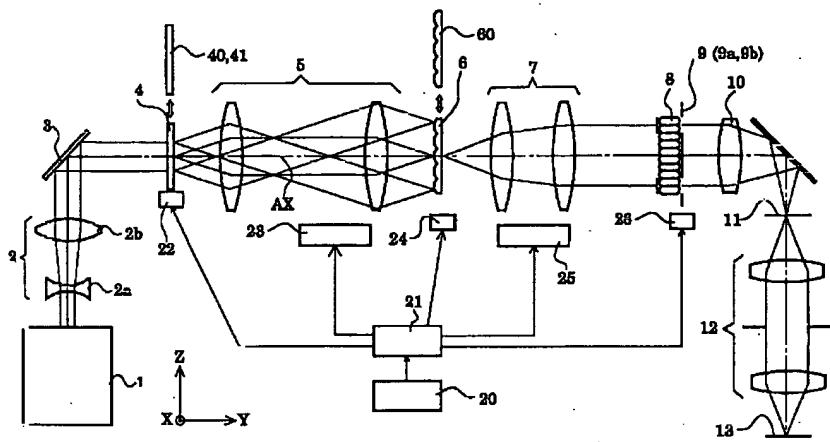
【符号の説明】

- 1 光源
- 4, 40, 41 回折光学素子
- 5 アフォーカルズームレンズ
- 6, 60 マイクロフライアイ
- 7 ズームレンズ
- 8 フライアイレンズ
- 9 開口絞り
- 10 コンデンサー光学系
- 11 マスク
- 12 投影光学系
- 13 ウェハ
- 20 入力手段
- 21 制御系
- 22~26 駆動系

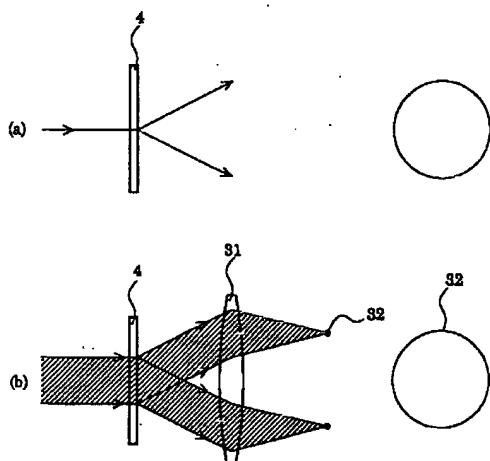
【図6】



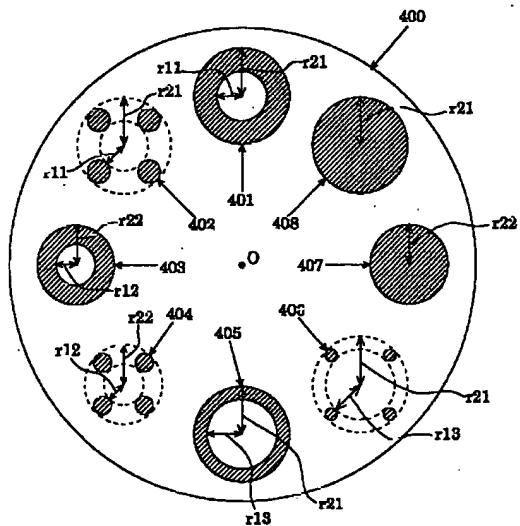
【図1】



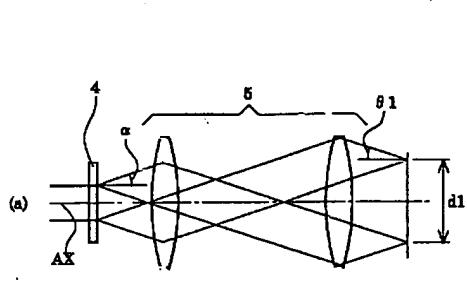
【図2】



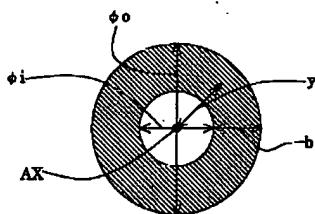
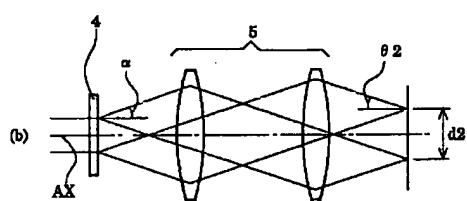
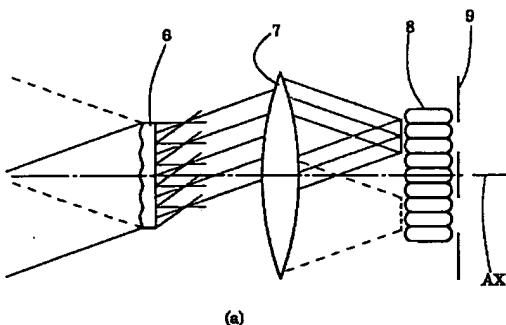
【図3】



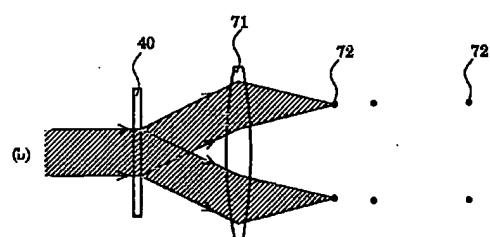
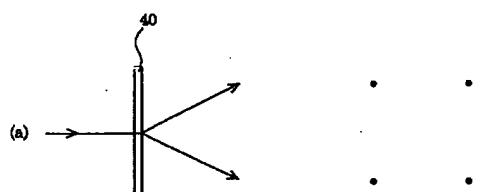
【図4】



【図5】



【図7】



フロントページの続き

(72)発明者 平賀 康一
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株
式会社ニコン内

F ターム(参考) 2H052 BA02 BA03 BA09 BA12
5F046 BA03 CB01 CB05 CB12 CB13
CB23 DA01 DD03